

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODIFIKASI BIDIRECTIONAL CUK
KONVERTER UNTUK APLIKASI CHARGING STATION**

**Andriazis Dahono
NRP 07111340000182**

**Dosen Pembimbing
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Falkutas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODIFIKASI
BIDIRECTIONAL CUK KONVERTER UNTUK APLIKASI
CHARGING STATION**

Andriazis Dahono
07111340000182

Dosen Pembimbing
Dedet C. Riawan, ST. M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIDIRECTIONAL
MODIFIED CUK CONVERTER FOR CHARGING
STATION APPLICATIONS**

Andriazis Dahono
07111340000182

Advisors
Dedet C. Riawan, ST. M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini Saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir Saya dengan judul "**Desain dan Implementasi Modifikasi Bidirectional Cuk Konverter untuk Aplikasi Charging Station**" adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang Saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2017



Andriazis Dahono
NRP. 07111340000182

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODIFIKASI
BIDIRECTIONAL CUK KONVERTER UNTUK
APLIKASI CHARGING STATION**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I


16
01

Dedet C. Riawan, ST, M.Eng., Ph.D.
NIP 197311192000031001

Dosen Pembimbing II


AC

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
NIP 196510121990031003

**SURABAYA
DESEMBER 2018**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODIFIKASI BIDIRECTIONAL CUK KONVERTER UNTUK APLIKASI CHARGING STATION

Nama : Andriazis Dahono
Pembimbing I : Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.
Pembimbing II : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Konverter DC-DC banyak dipakai dalam pembangkit listrik tenaga surya sebagai pengisi baterai pada *charging station*. Agar umur baterainya panjang maka konverter DC-DC harus mempunyai riak sekecil mungkin. Selain itu konverter DC-DC yang digunakan harus mempunyai efisiensi setinggi mungkin. Konverter DC-DC jenis boost memiliki penguatan yang tinggi. Sayangnya konverter DC-DC jenis boost mempunyai riak arus keluaran yang besar.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan desain dan implementasi modifikasi konverter DC-DC bidirectional jenis Cuk yang mempunyai arus masukan dan keluaran dengan riak yang rendah. Dengan mengambil terminal tegangan keluaran yang baru, maka konverter ini mempunyai penguatan yang tinggi seperti halnya konverter boost. Metoda analisis tegangan keluaran, riak arus induktor, dan riak arus kapasitor telah dilakukan. Metoda analisis yang dibuat telah diverifikasi lewat simulasi dan percobaan. Konverter ini juga sudah diuji kemampuan *bidirectional*nya. Sehingga konverter hasil modifikasi konverter Cuk ini cocok digunakan untuk aplikasi *charging station*.

Kata Kunci: Konverter DC-DC, *Charging station*, Cuk.

(Halaman sengaja dikosongkan)

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIDIRECTIONAL
MODIFIED CUK CONVERTER FOR CHARGING STATION
APPLICATIONS**

Name	: Andriazis Dahono
1st Advisor	: Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D..
2nd Advisor	: Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

DC-DC converters are widely used in battery charging station systems. In order to ensure the long capacitor and battery life, the DC-DC converter should have minimum input and output current ripples. Moreover, the DC-DC converter should have maximum efficiency. Boost DC-DC converter has a high voltage gain and low input ripple. Unfortunately the boost DC-DC converter has a large output current ripple. In this final project, design and implementation of modified bidirectional DC-DC converter type Cuk has low input and output current with low ripple. By taking the new output voltage terminal, this converter has a high gain as well as the boost converter. The output voltage analysis method, the inductor current ripple, and the ripple current of the capacitor have been performed. The method of analysis has been verified by simulation and experiment. This converter has also tested its bidirectional ability. So this modified converter is suitable for charging station applications.

Keywords: *DC-DC Converter, Charging Station, Cuk.*

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur Saya panjatkan kepada Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga Saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.

Tugas akhir yang berjudul “**Desain dan Implementasi Modifikasi Bidirectional Cuk Konverter untuk Aplikasi Charging Station**” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Pelaksanaan dan penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu Saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orangtua yang selalu memberikan dukungan moral dan materi. Terkhusus bapak, terimakasih atas nasehat dan semangat yang diberikan.
2. Bapak Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.. dan Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing atas segala ilmu dan waktu yang telah diberikan untuk membimbing Saya hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Heri Suryatmojo, ST., MT. selaku kepala Laboratorium Konversi Energi atas peminjaman fasilitas yang ada di laboratorium untuk mendukung terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Dr. Arwindra dan Sulthon ST yang banyak membantu dan memberikan masukan dalam pengerjaan alat di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, ITB.
5. Teman-teman dari berbagai pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu yang sudah membantu saya menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Akhir kata, penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi siapapun yang ingin mendalami ilmu mengenai konverter ini. Semoga bermanfaat.

Surabaya, Desember 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Tugas Akhir	3
1.4. Metodologi	3
1.5. Sistematika Penulisan	4
1.6. Manfaat	5
 BAB II DASAR TEORI KONVERTER	 7
2.1. Pendahuluan.....	7
2.2. Konverter Boost.....	7
2.3. Konverter Buck-Boost.....	9
2.4. Konverter Cuk.....	11
2.5. Perbandingan Konverter Daya.....	13
 BAB III MODIFIKASI KONVERTER CUK	 15
3.1. Pendahuluan.....	15
3.2. Modifikasi Konverter Cuk.....	15
3.3. Analisis Rasio Tegangan.....	18
3.4. Analisis Riak.....	20
3.5. Hasil Simulasi.....	22
 BAB IV HASIL PERCOBAAN	 31
4.1. Pendahuluan.....	31
4.2. Skema Sistem.....	32
4.3. Perancangan Konverter Sukolilo.....	32
4.4. Hasil Pengukuran Tegangan.....	36
4.5. Hasil Pengukuran Riak Arus Induktor.....	38

4.6. Hasil Pengukuran Aliran Daya Bidirectional.....	40
4.7. Efisiensi.....	41
 BAB V PENUTUP	
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
 DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN.....	47
RIWAYAT HIDUP PENULIS	59

TABLE OF CONTENTS

PAGE TITLE	
STATEMENT SHEET	
VALIDITY SHEET	
ABSTRACT	i
FOREWORD	v
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	ix
LIST OF TABLES	xii
 BAB I INTRODUCTION	 1
1.1. Background....	1
1.2. Formulation of Problem	2
1.3. The purpose of Final Project	3
1.4. Methodology	3
1.5. Writing System	4
1.6. Merit	5
 BAB II BASIC THEORY OF CONVERTER	 7
2.1. Introduction.....	7
2.2. Boost Converter.....	7
2.3. Buck-Boost Converter.....	9
2.4. Cuk Converter.....	11
2.5. Comparison of Power Converter.....	13
 BAB III MODIFIED CUK CONVERTER	 15
3.1. Introduction.....	15
3.2. Modified Cuk Converter.....	15
3.3. Voltage Ratio Analysis.....	18
3.4. Ripple Analysis.....	20
3.5. Simulation Results.....	22
 BAB IV EXPERIMENT RESULTS	 31
4.1. Introduction.....	31
4.2. System Scheme.....	32
4.3. Designing Sukolilo Converter.....	32
4.4. Voltage measurement results.....	36
4.5. Inductor Ripple Current Measurement Results.....	38

4.6. Bidirectional Power Flow Measurement Results.....	40
4.7. Efficiency.....	41
BAB V CLOSING	
5.1. Conclusion	43
5.2. Advice	43
BIBLIOGRAPHY	45
ATTACHMENT.....	47
AUTHOR’S LIFE HISTORY	59

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 1.1. Sistem mikrogrid DC.....	2
Gambar 2.1. Skema konverter boost.....	8
Gambar 2.2. Gelombang konverter boost.....	8
Gambar 2.3. Skema konverter buck-boost.....	9
Gambar 2.4. Gelombang konverter buck-boost.....	10
Gambar 2.5. Skema konverter Cuk.....	11
Gambar 2.6. Gelombang konverter Cuk.....	12
Gambar 3.1. Penurunan konverter baru.....	16
Gambar 3.2. Konverter Sukolilo hasil modifikasi konverter Cuk....	17
Gambar 3.3. Aliran arus saat Q1 menerima sinyal ON.....	18
Gambar 3.4. Aliran arus saat Q2 menerima sinyal ON.....	19
Gambar 3.5. Gelombang riak arus induktor dan arus kapasitor C...	21
Gambar 3.6. Skema simulasi <i>open loop</i>	24
Gambar 3.7. Bentuk gelombang arus induktor L_d tanpa induktansi mutual (atas), dan dengan induktansi mutual (bawah) saat <i>duty cycle</i> 0,4.....	25
Gambar 3.8. Bentuk gelombang arus induktor L_d tanpa induktansi mutual (atas), dan dengan induktansi mutual (bawah) saat <i>duty cycle</i> 0,7.....	26
Gambar 3.9. Perbandingan Tegangan perhitungan dan simulasi tegangan keluaran konverter Sukolilo dengan Cuk....	26
Gambar 3.10. Perbandingan hasil perhitungan dan simulasi arus induktor.....	27
Gambar 3.11. Skema simulasi <i>closed loop</i>	28
Gambar 3.12. Tegangan beban (atas), tegangan sumber (tengah), dan arus sumber (bawah) saat tegangan sumber berubah.....	29
Gambar 3.13. Tegangan beban (atas), arus PV (tengah), dan arus sumber (bawah) saat arus PV berubah-ubah.....	30
Gambar 4.1. Skema sistem percobaan.....	32
Gambar 4.2. Skema konverter Sukolilo.....	32
Gambar 4.3. Rangkaian <i>Gate Driver</i>	33
Gambar 4.4. Skema pengendalian dua MOSFET.....	34
Gambar 4.5. Sinyal PWM dengan adanya <i>deadtime</i>	35
Gambar 4.6. Konverter Sukolilo.....	36

Gambar 4.7. Perbandingan hasil percobaan dengan perhitungan tegangan keluaran.....	37
Gambar 4.8. Gelombang arus i_d (biru), dan arus i_o (oranye) untuk <i>dutycycle</i> 0,4(atas) dan 0,7(bawah)	39
Gambar 4.9. Perbandingan hasil percobaan dengan perhitungan riak arus induktor.....	40
Gambar 4.10. Gelombang arus induktor saat aliran daya positif dan negatif.....	41
Gambar 4.11. Kurva Efisiensi.....	42

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 2.1. Perbandingan konverter DC-DC.....	13
Tabel 4.1. Data MOSFET IRFP260.....	33
Tabel 4.2. Hasil pengukuran tegangan.....	37
Tabel 4.3. Hasil pengukuran riak arus induktor.....	38
Tabel 4.4. Data hasil pengukuran efisiensi.....	41

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

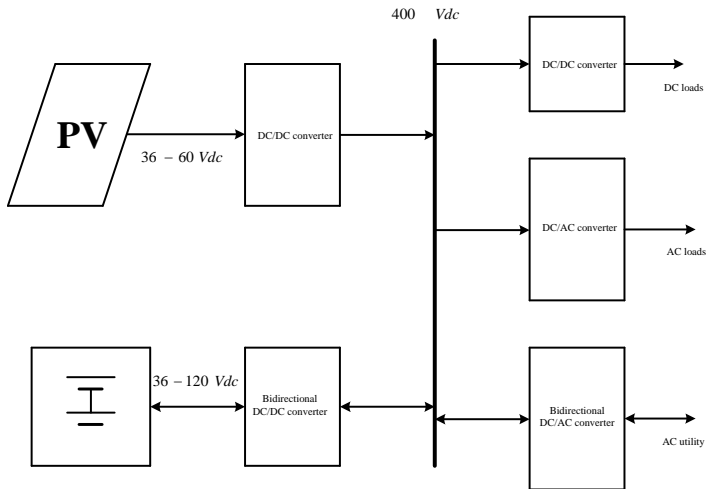
1.1 Latar Belakang

Pemerintah telah menargetkan penggunaan energi baru dan terbarukan sebesar 23 % pada tahun 2025. Salah satu sumber energi terbarukan adalah energi surya dengan menggunakan photovoltaic (PV). Untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya, biasanya dibuat sistem jaringan mikro (*microgrid*) [1]-[2]. Contoh skema mikrogrid DC diperlihatkan di Gambar 1.1. Sistem ini adalah jaringan mikro DC dengan tegangan kerja 120, 400, atau 800 Vdc. Tegangan keluaran sel surya yang biasanya berkisar antara 30-72 Vdc dinaikan menjadi tegangan 120 Vdc untuk mensuplai beban-bebannya. Beban-beban yang digunakan pada sistem ini ada beban DC yang tegangannya dinaikan atau diturunkan menggunakan konverter DC-DC, kemudian juga terdapat beban jaringan PLN yang terhubung ke sistem melalui penyearah *bidirectional*, dan juga Beban AC yang terhubung ke sistem melalui inverter. Akan tetapi, sumber PV memiliki sifat intermiten. Oleh karena itu, diperlukan baterai yang terhubung ke jaringan melalui konverter DC-DC *bidirectional*. Gambar itu memperlihatkan bahwa konverter DC-DC penaik tegangan(*step-up*) diperlukan untuk sel surya maupun baterai. Sistem jaringan mikro semacam ini diharapkan bisa meningkatkan rasio elektrifikasi terutama di daerah yang jauh dari jangkauan PLN.

Idealnya, konverter DC-DC penaik tegangan yang dipakai dalam *microgrid* mempunyai karakteristik [3]-[5] :

- i. Riak arus masukan dan keluarannya kecil
- ii. Efisiensinya tinggi
- iii. Rasio tegangannya tinggi
- iv. Polaritas tegangannya tidak terbalik

Riak arus masukan yang besar bisa mengganggu kinerja sel surya maupun baterai. Riak arus keluaran yang besar bisa merusak tapis kapasitor. Efisiensi yang tinggi biasanya dicapai dengan menggunakan konverter DC-DC tanpa trafo. Rasio tegangan yang tinggi sedapat mungkin dicapai tanpa menggunakan *duty cycle* yang terlalu besar sehingga memudahkan pengendalian. Polaritas tegangan yang terbalik sering mempersulit penerapannya.



Gambar 1.1. Sistem mikrogrid DC.

Berbagai konverter daya yang cocok untuk penerapan di Gambar 1.1 telah diusulkan dalam literatur. Walaupun demikian, konverter DC-DC yang umum digunakan adalah konverter boost, buck-boost, dan Cuk. Sayangnya, tidak ada konverter yang memenuhi empat karakteristik yang diinginkan. Oleh sebab itu masih perlu dicari konverter yang bisa memenuhi empat kriteria yang ada.

1.2 Perumusan Masalah

Secara umum konverter DC-DC bisa dikategorikan sebagai jenis *isolated* (tidak langsung) dan *non-isolated* (langsung)[3]-[6]. Karena efisiensi yang tinggi penting dalam jaringan DC hanya konverter DC-DC jenis *non-isolated* yang banyak dipakai. Konverter DC-DC yang umum dipakai, yaitu jenis boost/buck, buck-boost, dan Cuk.

Untuk aplikasi dalam *charging station* diinginkan konverter DC-DC yang mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- i. Arus sisi tegangan rendah kontinyu (riaknya kecil)
- ii. Arus sisi tegangan tinggi (riaknya kecil)
- iii. *Duty-cycle* tidak terlalu besar.

Konverter buck-boost kurang cocok dalam *charging station* karena baik arus masukan maupun keluarannya tidak kontinyu. Konverter

boost/buck mempunyai arus masukan yang kontinyu tetapi arus keluarannya tidak kontinyu. Konverter Cuk mempunyai arus masukan dan keluaran yang kontinyu. Arus masukan yang kontinyu menunjukkan riak arus yang kecil. Dengan riak arus yang kecil, kapasitor elektrolit yang dipakai sebagai tapis bisa berukuran kecil dan berumur panjang. Riak arus masukan yang kecil juga penting untuk memperpanjang umur modul surya. Untuk rasio tegangan yang sama, konverter Cuk memerlukan *duty cycle* yang lebih besar dibanding konverter jenis boost. Sebagai contoh jika diinginkan rasio tegangan 10 maka diperlukan konverter boost dengan *duty cycle* 9/10 sedangkan konverter Cuk memerlukan *duty cycle* 10/11. Jadi konverter boost mempunyai *duty cycle* yang lebih kecil dibanding konverter Cuk untuk rasio tegangan yang sama. Selain itu polaritas tegangan konverter Cuk terbalik, sehingga mempersulit penggunaannya.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Secara singkat, tujuan tugas akhir ini adalah:

- i) Membuat konverter DC-DC baru yang memenuhi empat kriteria yang diinginkan untuk aplikasi *charging station*. Jika diproduksi, diharapkan bisa mengurangi ketergantungan pada barang import.
- ii) Melakukan ujicoba lewat simulasi dan percobaan untuk menguji tugas konsep yang diusulkan

1.4 Metodologi

Metodologi yang dilakukan dalam melaksanakan tugas akhir adalah

- i) Studi literatur
Pengumpulan referensi-referensi dari berbagai sumber, yang berupa jurnal, buku, dan berbagai paper-paper penelitian sebelumnya untuk mendapatkan pemahaman dan pengertian mengenai tugas akhir yang dilakukan.
- ii) Mengusulkan konverter DC-DC baru
Mengusulkan dan membandingkan konverter DC-DC baru ini dengan konverter-konverter yang ada dilihat dari kinerjanya seperti rasio tegangan, kontinuitas arus masukan dan keluaran, dan lain-lain.

- iii) Melakukan analisis kinerja
Melakukan analisis perhitungan tegangan dan riak arus induktor dari konverter DC-DC yang baru.
- iv) Melakukan simulasi dan penentuan parameter
Melakukan simulasi di *software* PSIM untuk menunjukkan bahwa converter DC-DC baru ini dapat diimplementasikan. Dan juga menentukan nilai dari masing-masing komponen yang akan digunakan dalam pembuatan alat.
- v) Melakukan percobaan
Melakukan percobaan dan pengambilan data di laboratorium. Data yang diambil berupa nilai tegangan dan arus di sisi masukan dan keluaran, riak arus induktor, dan aliran daya bidirectional. Kemudian membandingkan hasilnya dengan teori hasil perhitungan dan simulasi.
- vi) Membuat laporan tugas akhir
Membuat laporan berdasarkan data yang didapat

1.5 Sistematika Penulisan

Pembahasan pada Tugas Akhir ini dibagi menjadi 5 bab yang diurutkan secara sistematis.

Bab pertama adalah pendahuluan, yang terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, tujuan tugas akhir, metodologi, sistematika penulisan, dan manfaat.

Bab kedua adalah dasar teori konverter, merupakan hasil dari studi literatur. yang menjadi landasan teori dari penelitian Tugas Akhir ini. Berisi penjelasan mengenai konverter-konverter yang sudah ada, dilihat kelebihan dan kekurangannya.

Bab ketiga adalah modifikasi dari konverter Cuk. Berisi modifikasi konverter Cuk menjadi konverter DC-DC yang baru untuk menyelesaikan permasalahan dari penelitian Tugas Akhir ini, beserta analisis tegangan dan riak arus induktornya, serta hasil dari simulasinya.

Bab keempat adalah hasil percobaan. Berisi sajian-sajian data hasil percobaan berupa tabel, grafik, dan gelombang arus, dan juga perbandingannya dengan teori hasil perhitungan.

Bab kelima adalah penutup, yang berisi kesimpulan dan saran.

1.6 Manfaat

Penelitian Tugas Akhir ini dapat diaplikasikan untuk *charging station* pada sebuah mikrogrid DC dimana konverter DC-DC baru ini memiliki keuntungan jika menggunakan konverter DC-DC yang sudah ada. Selain itu konverter yang diusulkan bisa mengurangi ketergantungan pada barang impor.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

DASAR TEORI KONVERTER

2.1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas prinsip kerja berbagai konverter daya DC-DC konvensional yang umum dipakai dalam mikrogrid DC dan pembangkit listrik energi terbarukan. Konverter DC-DC konvensional yang dibahas adalah konverter :

- i) Boost
- ii) Buck-Boost
- iii) Cuk

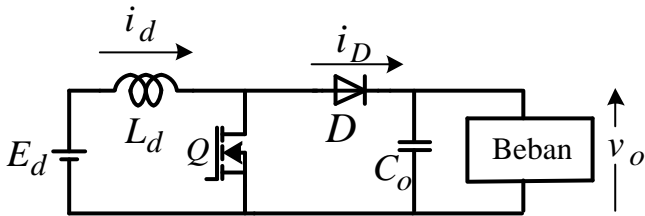
Selanjutnya dibahas teori dasar yang bisa dipakai dalam menurunkan konverter DC-DC yang baru. Detail analisis konverter daya DC-DC bisa dibaca di literatur [3]-[6].

2.2 Konverter Boost

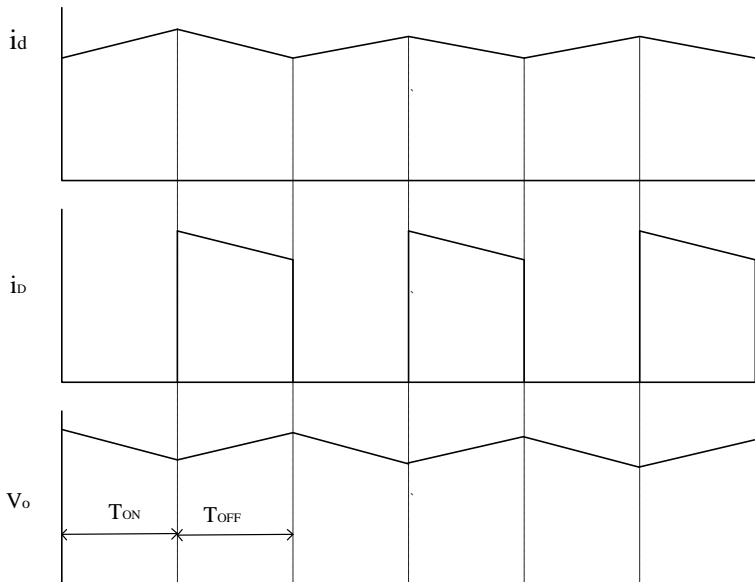
Gambar 2.1 memperlihatkan skema konverter DC-DC jenis boost dengan kemampuan aliran daya dua arah (bidirectional). Jika aliran daya hanya searah (seperti pada aplikasi PV) maka dioda D1 dan saklar Q2 tidak diperlukan.

Gambar 2.2 memperlihatkan gelombang tegangan dan arus konverter saat daya mengalir dari sumber ke beban. Diasumsikan bahwa aliran arus di induktor L bersifat kontinyu. Secara umum, prinsip kerja dari konverter boost adalah:

- i) Saat transistor Q1 dinyalakan atau ON, maka transistor Q2 dimatikan atau OFF. Akibatnya arus di induktor L akan naik. Kebutuhan daya beban dipasok oleh energi yang tersimpan di kapasitor C. Transistor Q1 akan dinyalakan selama waktu T_{ON} .
- ii) Saat transistor Q1 dipadamkan atau OFF maka transistor Q2 akan dinyalakan atau ON. Arus induktor akan mengalir dari sumber menuju kapasitor dan beban melalui diode D2. Karena tegangan keluaran lebih tinggi dari sumbernya, arus induktor akan menurun. Transistor Q1 akan padam selama waktu T_{OFF} .



Gambar 2.1. Skema konverter boost.



Gambar 2.2. Gelombang konverter Boost.

Berdasarkan gelombang tersebut, rasio antara tegangan keluaran dan masukan adalah

$$\frac{V_o}{E_d} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (2-1)$$

dengan mana

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_s} \quad (2-2)$$

adalah faktor kerja (*duty cycle*) transistor Q1. Sedangkan

$$T_s = 1 / f_s \quad (2-3)$$

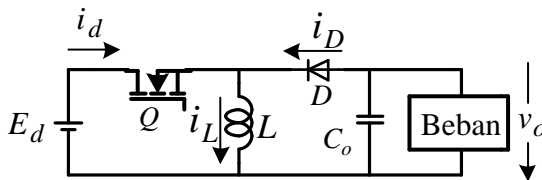
adalah periode penyaklaran atau periode switching dan f_s adalah frekuensi penyaklaran.

Berdasarkan Gambar 2.1 dan persamaan (2-1) maka dapat disimpulkan bahwa konverter boost mempunyai karakteristik sebagai berikut:

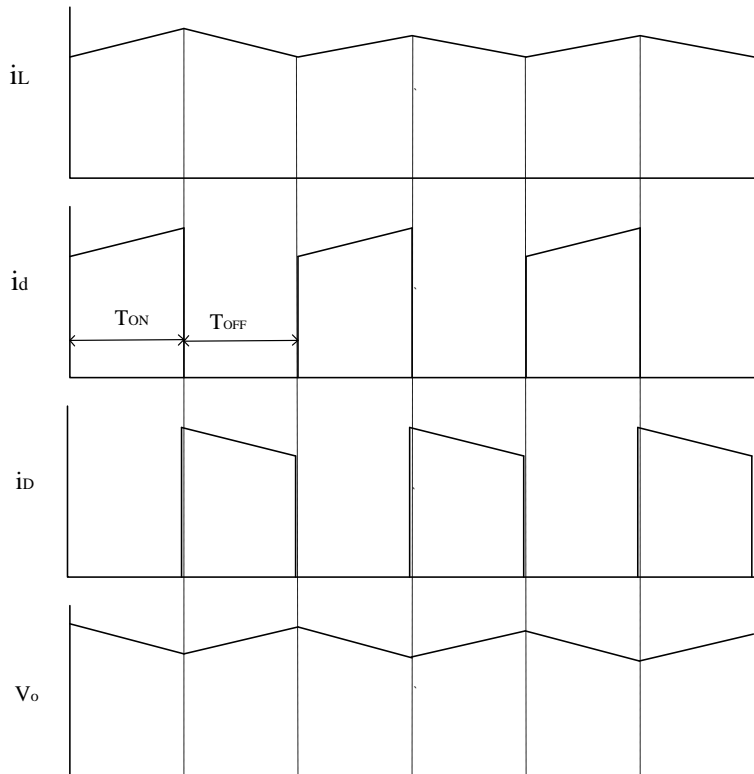
- i) Arus masukan yang kontinyu (riak rendah).
- ii) Arus masukan yang tak kontinyu (riak besar)
- iii) Rasio tegangan keluaran terhadap tegangan masukan selalu lebih atau sama dengan satu.
- iv) Polaritas tegangan keluaran sama dengan tegangan masukan.

2.3 Konverter Buck-Boost

Skema konverter DC-DC jenis buck-boost diperlihatkan di Gambar 2.3. Sama seperti halnya konverter boost, diode D1 dan transistor Q2 tidak diperlukan jika aliran daya hanya satu arah. Gambar 2.4 memperlihatkan gelombang tegangan dan arus pada konverter buck-boost.



Gambar 2.3. Konverter buck-boost.



Gambar 2.4. Gelombang konverter buck-boost.

Diasumsikan bahwa arus di induktor L bersifat kontinyu. Secara umum, prinsip kerja dari konverter buck-boost adalah:

- i) Saat transistor Q1 dinyalakan atau ON, maka transistor Q2 dimatikan atau OFF. Akibatnya arus di induktor L akan naik. Kebutuhan daya beban dipasok oleh energi yang tersimpan di kapasitor C . Transistor Q1 akan dinyalakan selama waktu T_{ON} .
- ii) Saat transistor Q1 dipadamkan atau OFF maka transistor Q2 akan dinyalakan atau ON. Arus induktor akan bersirkulasi ke kapasitor dan beban melalui dioda $D2$. Akibatnya arus induktor L akan menurun. Transistor Q1 akan padam selama waktu T_{OFF} .

Berdasarkan Gambar 2.4, rasio tegangan keluaran konverter terhadap tegangan masukannya adalah:

$$\frac{V_o}{E_d} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2-4)$$

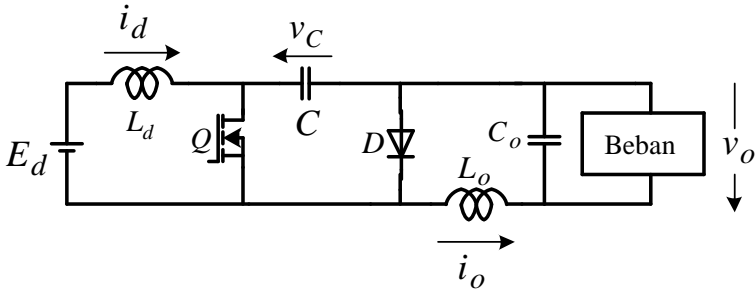
Berdasarkan Gambar 2.4 dan persamaan (2-4) maka dapat disimpulkan:

- i) Arus masukan yang tak kontinyu (riak besar).
- ii) Arus keluaran yang tak kontinyu (riak besar)
- iii) Tegangan keluaran bisa lebih tinggi maupun lebih rendah dari tegangan masukan.
- iv) Polaritas tegangan keluaran terbalik terhadap tegangan masukan.

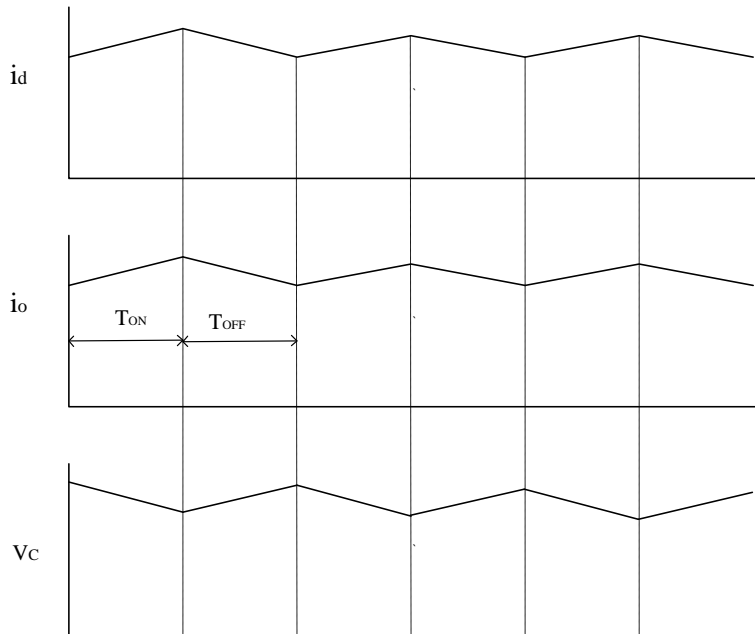
2.4 Konverter Cuk

Konverter Cuk adalah konverter daya DC-DC yang diciptakan oleh Prof. Slobodan Cuk dari California Institute of Technology [7]. Konverter ini bisa diturunkan sebagai kombinasi konverter boost dan buck atau sebagai dual dari konverter buck-boost. Skema dari konverter DC-DC Cuk ini diperlihatkan di Gambar 2.5.

Gelombang tegangan dan arus konverter Cuk diperlihatkan di Gambar 2.6. Diasumsikan bahwa arus di induktor L_1 dan L_2 bersifat kontinyu. Selain itu diasumsikan pula bahwa kapasitor C cukup besar sehingga tegangannya bisa dianggap tetap.



Gambar 2.5. Skema konverter Cuk.



Gambar 2.6. Gelombang konverter Cuk.

Secara umum, prinsip kerja dari konverter Cuk adalah:

- i) Saat transistor Q1 dinyalakan atau ON, maka transistor Q2 dimatikan atau OFF. Karena induktor L1 dihubungsingkat oleh transistor Q1 maka arus di induktor L1 akan naik. Selain itu, kapasitor C akan mengisi kebutuhan energi di induktor L2 dan bebannya melalui transistor Q1 sehingga tegangan di kapasitr C akan menurun dan arus di induktor L2 naik. Transistor Q1 akan dinyalakan selama waktu T_{ON} .
- ii) Saat transistor Q1 dipadamkan atau OFF maka transistor Q2 akan dinyalakan atau ON. Arus induktor L1 akan mengalir mengisi kapasitor C, akibatnya arus di induktor L1 menurun dan teganga kapasitor C akan naik. Pada saat yang sama, arus di induktor akan bersirkulasi menuju beban melalui dioda D2 sehingga arus di inductor L2 menurun. Transistor Q1 akan padam selama waktu T_{OFF} .

Berdasarkan gelombang di Gambar 2.6 maka rasio tegangan keluaran terhadap tegangan masukan konverter Cuk adalah

$$\frac{V_o}{E_d} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2-5)$$

Berdasarkan Gambar 2.6 dan persamaan (2-5) maka dapat disimpulkan:

- i) Arus masukan yang kontinyu (riak rendah).
- ii) Arus masukan yang kontinyu (riak rendah)
- iii) Tegangan keluaran bisa lebih tinggi maupun lebih rendah dari tegangan masukan.
- iv) Polaritas tegangan keluaran terbalik terhadap tegangan masukan.

2.5 Perbandingan Konverter Daya

Berdasarkan analisis yang dilakukan sebelumnya, maka perbandingan antar tiga konverter konvensional bisa disarikan seperti diberikan di Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan konverter DC-DC

Nama	Boost	Buck-Boost	Cuk
Skema	Gambar 2-1	Gambar 2-3	Gambar 2-5
Rasio tegangan	$\frac{V_o}{E_d} = \frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_o}{E_d} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_o}{E_d} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$
Arus sisi masukan	Kontinyu	Tak kontinyu	Kontinyu
Arus sisi keluaran	Tak kontinyu	Tak kontinyu	Kontinyu
Polaritas tegangan	Tidak terbalik	Terbalik	Terbalik

Untuk aplikasi *charging station* atau pembangkit PV yang diinginkan maka dapat disimpulkan:

- i) Konverter daya seperti konverter Cuk yang mempunyai arus masukan dan keluaran kontinyu.
- ii) Konverter daya seperti konverter boost yang mempunyai rasio selalu lebih besar dari satu dengan polaritas tegangan tak terbalik. Dengan rasio tegangan selalu lebih dari satu maka untuk *duty cycle* yang sama, konverter boost

menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibanding konverter buck-boost dan Cuk.

BAB III

MODIFIKASI KONVERTER CUK

3.1 Pendahuluan

Berbagai cara telah dikembangkan untuk menciptakan konverter DC-DC. Secara umum metode yang dipakai adalah:

- i. Konsep *graph* [8]-[9]
- ii. Konsep *canonical switch* [10]-[11]
- iii. Konsep *duality* [12]
- iv. Konsep diagram blok [13]-[14]

Pada tugas akhir ini akan digunakan metode karakterisasi tegangan terminal konverter DC-DC untuk menciptakan konverter DC-DC yang baru. Metode ini digunakan karena lebih mudah dipahami dibanding empat metode diatas. Konsep ini merupakan pengembangan dari konsep yang dipublikasikan oleh professor William[14]. Dengan menggunakan konsep ini, konverter DC-DC yang dikembangkan oleh professor Cuk dimodifikasi.

3.2 Modifikasi Konverter Cuk

Topologi konverter Cuk konvensional diperlihatkan di Gambar 3.1(a). Ciri khas dari konverter Cuk adalah mempunyai arus masukan dan keluaran yang kontinu sehingga kandungan riaknya rendah. Penguatan tegangan dari konverter Cuk konvensional dapat dilihat pada persamaan (2-5).

Kelemahan utama dari konverter Cuk adalah mempunyai polaritas tegangan yang terbalik. Pada penguatan tegangan yang sama, konverter Cuk memerlukan *duty cycle* yang lebih tinggi dibanding konverter boost konvensional. *Duty cycle* akan membawa masalah jika diinginkan rasio tegangan yang sangat tinggi.

Tanpa merubah fungsi, konverter Cuk bisa digambar seperti terlihat di Gambar 3.1(b). Berdasarkan gambar ini, bisa didapatkan tegangan di terminal ketiga yang besarnya

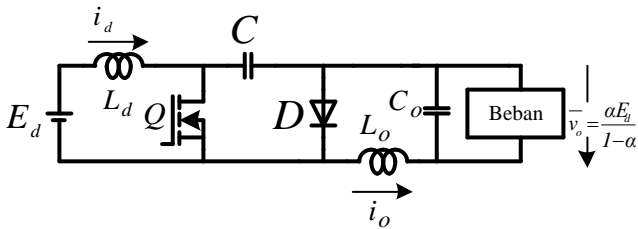
$$\frac{\bar{v}_o'}{E_d} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (3-1)$$

Jika beban dihubungkan ke terminal ketiga ini maka didapatkan penguatan tegangan yang lebih besar dibanding jika menggunakan

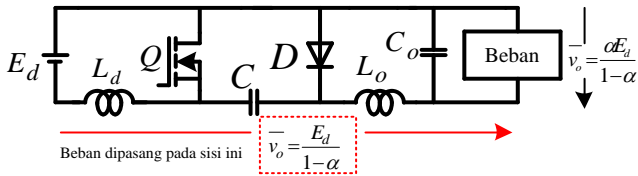
terminal output konvensional. Dengan menggunakan pemikiran ini maka konverter Cuk bisa kita modifikasi menjadi seperti terlihat di Gambar 3.2(a). Dibandingkan dengan konverter Cuk konvensional, konverter ini mempunyai kelebihan sebagai berikut:

- i) Penguatan tegangan lebih tinggi untuk duty cycle yang sama
- ii) Polaritas tegangan tidak terbalik
- iii) Efisiensi lebih tinggi karena tidak semua daya diproses oleh konverter.

Untuk keperluan *charging station*, diperlukan konverter yang mampu mengalirkan daya di dua arah. Untuk tujuan ini, konverter di Gambar 3.2(a) dimodifikasi menjadi seperti terlihat di Gambar 3.2(b). Agar riak sisi masukan dan keluaran bisa lebih kecil lagi, kedua induktor bisa digandeng dalam satu inti. Untuk selanjutnya, hasil modifikasi konverter Cuk ini diusulkan mempunyai nama konverter SUKOLILO.

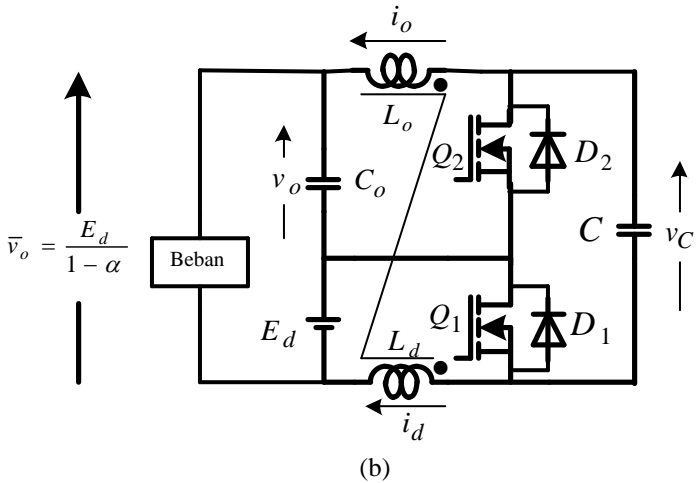
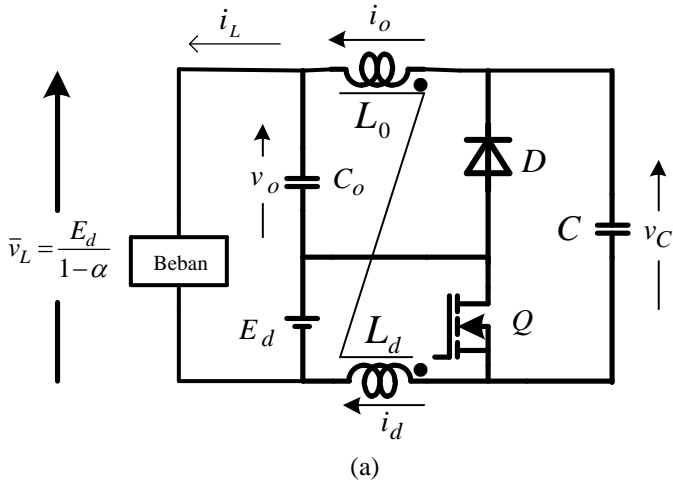


(a)



(b)

Gambar 3.1. Penurunan konverter baru.



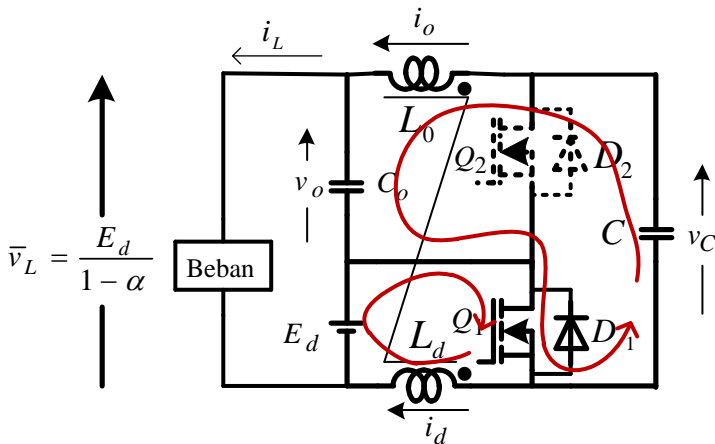
Gambar 3.2. Konverter Sukolilo hasil modifikasi konverter Cuk.

Jika dibandingkan dengan tiga konverter konvensional yang sudah dibahas di BAB II, maka konverter Sukolilo yang diusulkan mempunyai keuntungan sebagai berikut :

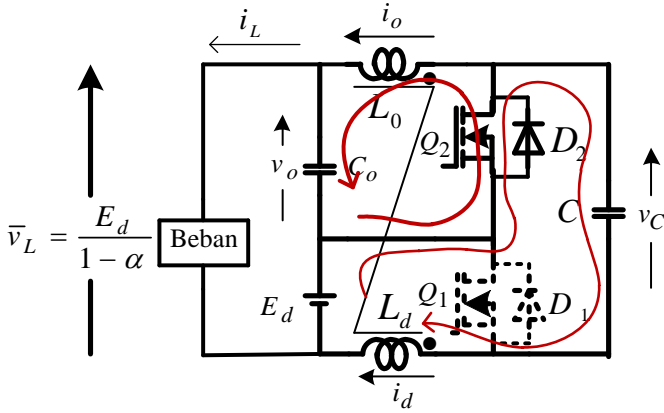
- i. Rasio tegangan seperti konverter boost
- ii. Arus masukan dan keluaran yang kontinu seperti konverter Cuk
- iii. Mempunyai tegangan keluaran dengan polaritas yang tidak terbalik

3.3 Analisis Rasio Tegangan

Transistor Q1 dan Q2 pada konverter di Gambar 3.2(b) selalu menerima sinyal perintah yang berlawanan. Jika transistor Q1 menerima sinyal ON maka transistor Q2 menerima sinyal OFF, demikian pula sebaliknya. Gambar 3.3 memperlihatkan aliran arus saat transistor Q1 menerima sinyal ON sedangkan transistor Q2 menerima sinyal OFF. Dan Gambar 3.4 memperlihatkan aliran arus saat transistor Q1 menerima sinyal OFF sedangkan transistor Q2 menerima sinyal ON. Jika diasumsikan bahwa arus bebannya positif maka pada kondisi ini, arus di induktor L_d dan induktor L_o naik.



Gambar 3.3. Aliran arus saat Q1 menerima sinyal ON.



Gambar 3.4. Aliran arus saat Q2 menerima sinyal ON.

Dalam analisis diasumsikan bahwa susut tegangan pada transistor yang konduksi adalah

$$v_Q = V_{Q0} + R_Q i_Q \quad (3-2)$$

Sedangkan susut tegangan pada dioda yang konduksi adalah

$$v_D = V_{D0} + R_D i_D \quad (3-3)$$

Induktor L_d dan L_o diasumsikan masing-masing mempunyai resistansi R_d dan R_o . Kapasitor diasumsikan ideal tanpa resistansi. Hasil persamaan keadaan aliran arus konverter dapat dilihat dalam lampiran. Transistor Q1 menerima sinyal ON selama α periode sedangkan sinyal OFF diterima selama $(1-\alpha)$ periode. Persamaan ruang keadaan rata-rata didapat dengan merata-ratakan persamaan (3-11) dan (3-18) menggunakan *State-Space Averaging*. Dari penurunan tersebut, didapatkan persamaan tegangan keluarannya adalah :

$$\bar{v}_o = \frac{\alpha E_d}{1-\alpha} - \frac{R_d(1-2\alpha+2\alpha^2)+R_Q}{(1-\alpha)^2} I_L \quad (3-4)$$

$$\bar{v}_L = \frac{E_d}{1-\alpha} - \frac{R_d(1-2\alpha+2\alpha^2)+R_Q}{(1-\alpha)^2} I_L \quad (3-5)$$

Persamaan (3-4) menyatakan persamaan tegangan keluaran konverter Cuk konvensional sedangkan persamaan (3-28) adalah persamaan konverter Sukolilo yang diusulkan. Untuk rasio tegangan yang sama,

misal 10 kali, maka konverter Cuk konvensional memerlukan duty factor $\alpha=10/11$ sedangkan konverter Sukolilo memerlukan *duty cycle* $\alpha=9/10$. Susut tegangan akibat resistansi pada konverter baru juga lebih kecil dibanding konverter Cuk konvensional. Artinya, susut daya konduksi di konverter baru yang diusulkan juga akan lebih kecil dibanding konverter Cuk konvensional.

3.4 Analisis Riak

Berdasarkan Gambar 3.3, kita bisa dapatkan persamaan tegangan berikut:

$$\begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d - v_{Q1} \\ v_{Q2} - v_o \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

yang mana v_{Q1} dan v_{Q2} adalah tegangan pada saklar Q_1 dan Q_2 .

Arus dan tegangan bisa kita bagi atas komponen dc dan riak sebagai berikut:

$$i_d = I_d + \tilde{i}_d \quad (3-7)$$

$$i_o = I_o + \tilde{i}_o \quad (3-8)$$

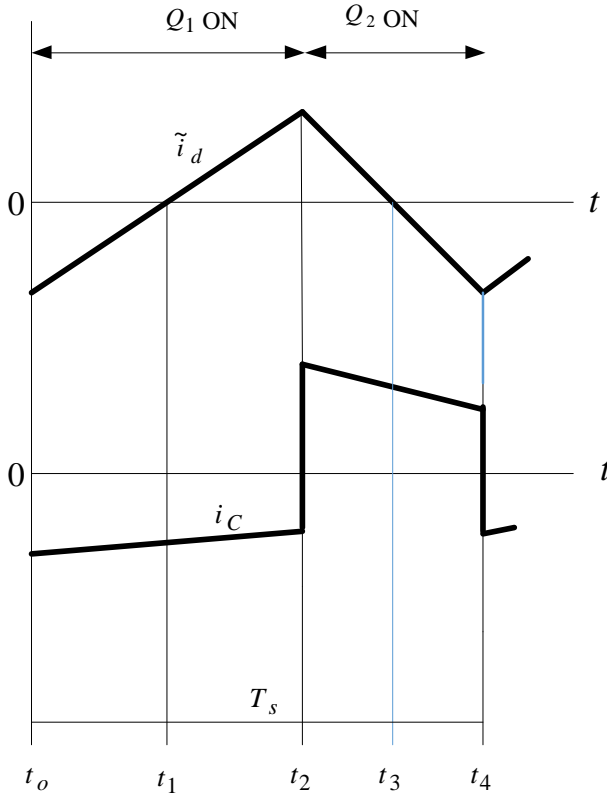
$$v_{Q1} = V_{Q1} + \tilde{v}_{Q1} \quad (3-9)$$

$$v_{Q2} = V_{Q2} + \tilde{v}_{Q2} \quad (3-10)$$

$$v_o = V_o + \tilde{v}_o \quad (3-11)$$

yang mana huruf besar dan tanda tilde masing-masing menyatakan nilai rata-rata dan riak.

Persamaan riak arus bisa didapatkan dengan persamaan keadaan Q_1 menerima sinyal ON dan Q_2 menerima sinyal OFF maupun sebaliknya. Artinya, riak arus bisa didapatkan dalam satu periode penyaklaran. Gambar 3.5 memperlihatkan gelombang riak arus selama satu periode penyaklaran.



Gambar 3.5. Gelombang riak arus induktor dan arus kapasitor C.

Dengan menghitung nilai rms riak arus selama satu periode penyaklaran, didapatkan riak arus induktor adalah sebagai berikut

$$\tilde{I}_d = \tilde{I}_o = \frac{\alpha E_d}{2\sqrt{3}f_s(L + M)} \quad (3-12)$$

Persamaan (3-12) menunjukkan bahwa induktansi mutual antara kedua induktor bisa menurunkan riak arus di induktor. Riak arus berbanding terbalik dengan frekuensi penyaklaran. Semakin tinggi α , atau semakin besar rasio tegangannya maka semakin besar riaknya. Untuk rasio tegangan yang sama, konverter yang diusulkan mempunyai *duty*

cycle yang lebih kecil dibanding konverter Cuk konvensional sehingga riak yang dihasilkan juga lebih kecil.

Pada saat saklar Q_1 menerima sinyal ON maka arus kapasitor C sama dengan $-i_o$. Sedangkan saat saklar Q_2 menerima sinyal ON maka arus kapasitor sama dengan i_d . kontribusi riak arus induktor pada riak arus kapasitor diabaikan. Jika susut daya diabaikan, kemudian menghitung rasio arusnya. Didapatkan nilai rms arus kapasitor C atau riak arus kapasitornya sebagai berikut

$$I_C = I_o \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{1/2} \quad (3-13)$$

Riak arus kapasitor C_o adalah sama dengan riak arus induktor L_o . Karena riak arus di kapasitor C cukup besar maka kapasitor C sebaiknya menggunakan kapasitor nonelektrolit yang mampu dialiri arus yang besar. Persamaan riak arus yang diturunkan diatas sangat penting untuk pemilihan nilai komponen induktor dan kapasitor

3.5 Hasil Simulasi

Untuk membuktikan validitas konsep yang diusulkan, mula-mula konverter Sukolilo disimulasikan lebih dahulu dengan menggunakan PSIM. Persamaan tegangan dan riak arus yang diturunkan juga diuji validitasnya dengan menggunakan PSIM.

3.5.1 Simulasi Open Loop

Penentuan nilai komponen untuk simulasi ini, ditentukan berdasarkan persamaan yang sudah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan persamaan (3-13), kapasitor C yang digunakan pada konverter Sukolilo harus mampu dialiri riak arus sebesar I_C . Dengan rating arus keluaran dari konverter adalah $500/120 \text{ Vdc} = 4,16 \text{ A}$. Untuk mendapatkan tegangan keluaran 120 V , konverter Sukolilo harus bekerja pada *duty cycle* $0,7$. Sehingga berdasarkan persamaan tersebut diperlukan kapasitor yang mampu dialiri riak arus minimum sebesar $4,16(0,7/1-0,7)^{1/2} = 6,35 \text{ A}$.

Berdasarkan analisis sebelumnya nilai *peak-to-peak* riak arus induktor L_d adalah

$$\tilde{I}_{d,pp} = \frac{E_d \alpha}{L_d f_s} \quad (3-14)$$

Arus kontinyu harus dijaga pada arus induktor L_d yang terkecil, sehingga

$$\tilde{I}_{d,pp} < 2\bar{I}_{d,min} \quad (3-15)$$

Sedangkan arus induktor minimum bisa ditentukan dengan

$$\bar{I}_{d,min} = \frac{V_L}{E_d} I_{L,min} \quad (3-16)$$

Dalam desain diusahakan arus tetap kontinu pada beban 20 % (0,832 A). Sehingga nilai minimum arus rata-rata induktor L_d adalah 2,77 A. Berdasarkan persamaan (3-14) dan (3-15), nilai minimum induktansi L_d adalah

$$L_d > \frac{E_d \alpha}{\tilde{I}_{d,pp} f_s} \quad (3-17)$$

Berdasarkan persamaan (3-15) dan (3-17), maka induktansi minimum adalah

$$L_d > \frac{2E_d \alpha}{\bar{I}_{d,min} f_s} \quad (3-18)$$

Dalam simulasi, frekuensi penyaklaran minimum adalah 5 kHz. Sedangkan *duty cycle* minimum adalah 0,2. Dengan memasukan data ini ke dalam persamaan (3-18) didapatkan induktansi minimum 1 mH.

Skema simulasi PSIM diperlihatkan di Gambar 3.6. Data simulasi yang digunakan adalah

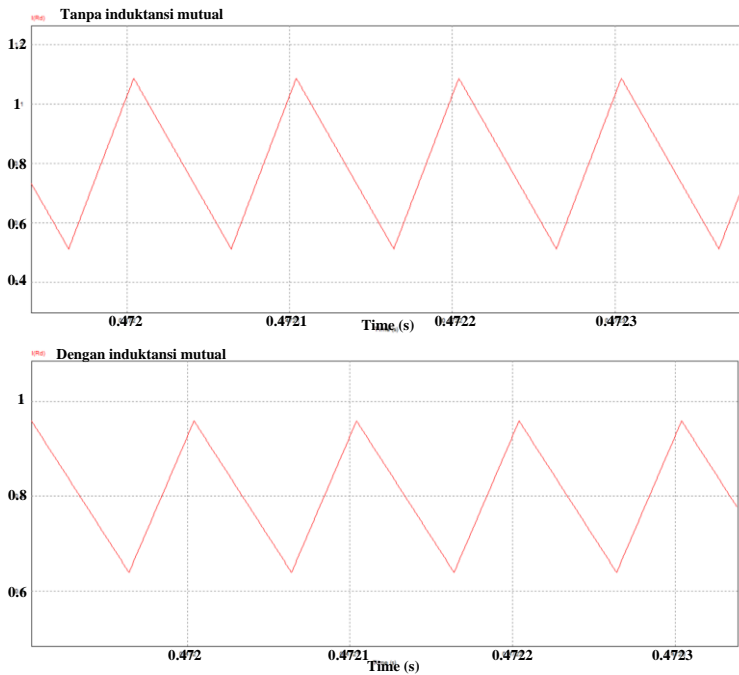
$E_d = 36 \text{ Vdc}$ $f_s = 10 \text{ kHz}$ $C = 2000 \text{ }\mu\text{F}$ $C_o = 1000 \text{ }\mu\text{F}$ $L_d=L_o= 2,5 \text{ mH}$

$R_d = R_o = 63 \text{ m}\Omega$ $R_Q=R_D = 55 \text{ m}\Omega$ $R_L = 107,4 \text{ }\Omega$

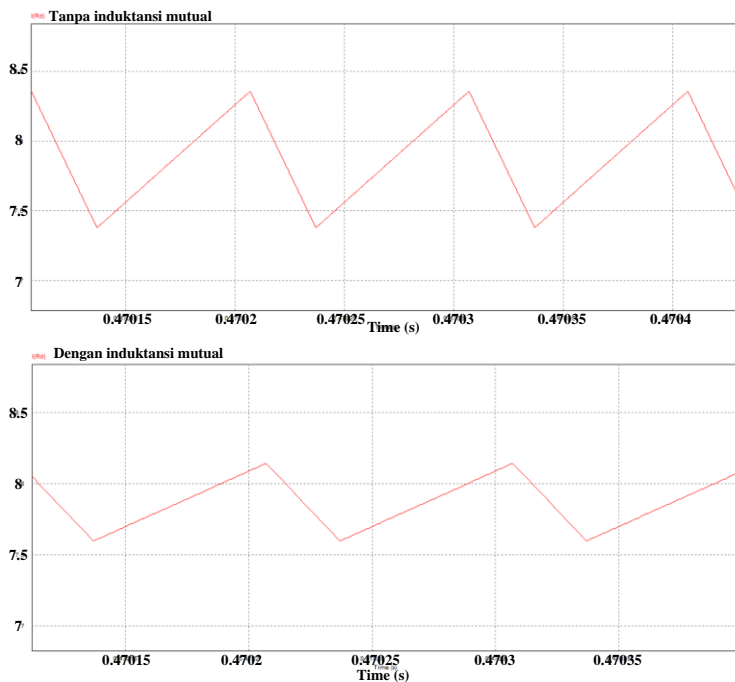
Gambar 3.7 dan 3.8 memperlihatkan hasil simulasi pada *duty cycle* 0,4 dan 0,7. Hasil simulasi menunjukkan kedua arus induktor bersifat kontinu. Hasil ini dengan jelas menunjukkan bahwa riak pada kedua induktor sangat kecil, demikian pula tegangan keluarannya. Simulasi juga dengan jelas menunjukkan bahwa riak akan mengecil jika kedua induktor disatukan sehingga mempunyai induktansi gandeng.

Gambar 3.9 menunjukkan tegangan keluaran sebagai fungsi *duty cycle*. Adanya resistansi pada induktor dan komponen semikonduktor menyebabkan tegangan keluaran tidak bisa mendekati tak berhingga saat *duty cycle* mendekati satu. Sebaliknya, adanya resistansi menyebabkan tegangan turun menuju nol saat *duty cycle* mendekati satu. Gambar 3.9 dengan jelas menunjukkan validitas persamaan yang diturunkan.

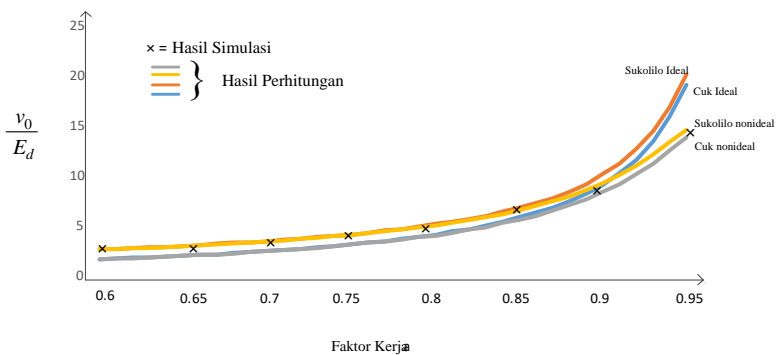
Gambar 3.6. Skema simulasi *open loop*.



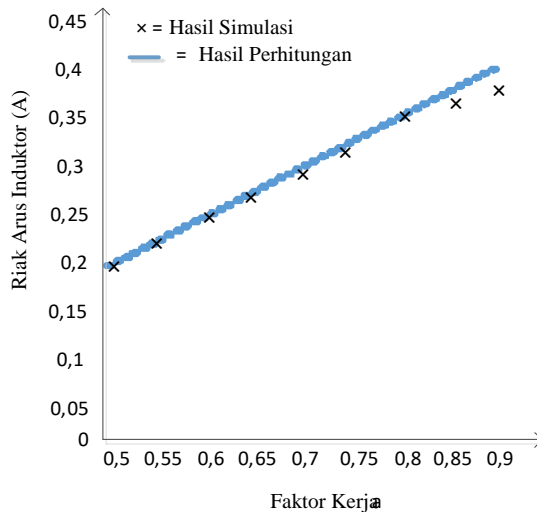
Gambar 3.7. Bentuk gelombang arus induktor L_d tanpa induktansi mutual (atas), dan dengan induktansi mutual (bawah) saat *duty cycle* 0,4.



Gambar 3.8. Bentuk gelombang arus induktor L_d tanpa induktansi mutual (atas), dan dengan induktansi mutual (bawah) saat *duty cycle* 0,7.



Gambar 3.9. Perbandingan Tegangan perhitungan dan simulasi tegangan keluaran konverter Sukililo dengan Cuk.



Gambar 3.10. Perbandingan Hasil perhitungan dan simulasi arus induktor

3.5.2 Simulasi Closed Loop

Untuk menguji kinerja konverter Sukolilo sebagai *battery charger/discharger*, simulasi *closed loop* dilakukan. Untuk penentuan parameternya, dilakukan hal yang sama seperti simulasi *open loop*. Skema simulasi ini diperlihatkan di Gambar 3.11. Konverter Sukolilo dikendalikan dengan pengendali dua *loop*. *Loop* luar mengendalikan tegangan beban sedangkan *loop* dalam mengendalikan tegangan induktor L_o . Beban dimodelkan dengan suatu resistansi. Paralel dengan beban dipasang sel surya (PV) yang dimodelkan sebagai sumber arus. Kabel yang menghubungkan beban dan konverter dan juga antara beban dan PV direpresentasikan dengan resistansi.

Dalam simulasi, parameter konverter adalah sebagai berikut:

Tegangan nominal $E_d = 36$ Vdc

$C_o = C = 500$ μ F

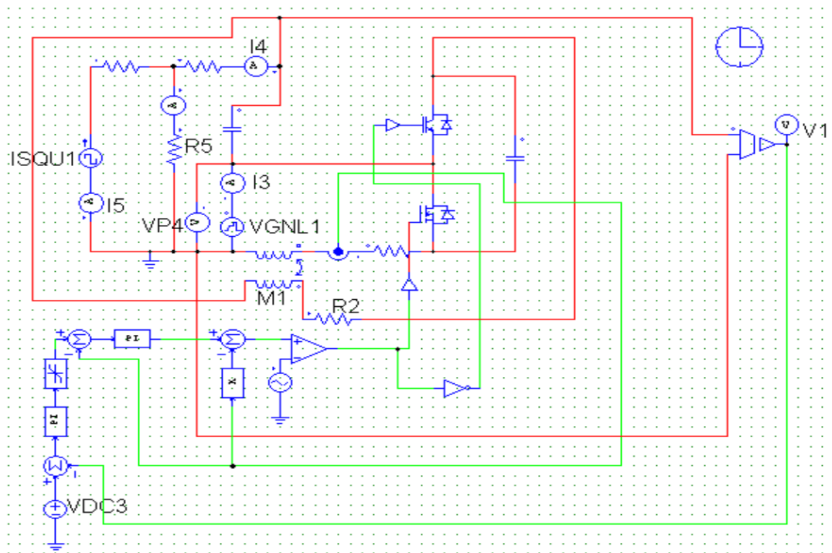
$L_d = L_o = 1$ mH

Induktansi mutual $M = 0,8$ mH

Frekuensi switching 20 kHz

Resistansi beban 50 Ohm

Resistansi kabel 0,1 Ohm

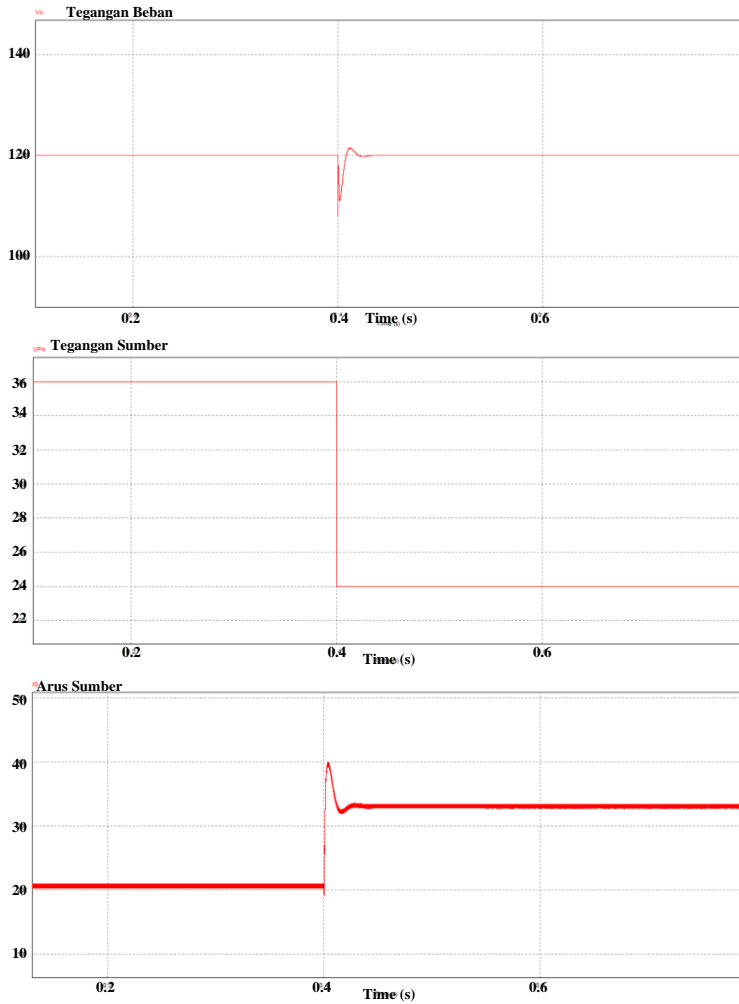


Gambar 3.11. Skema simulasi *closed loop*.

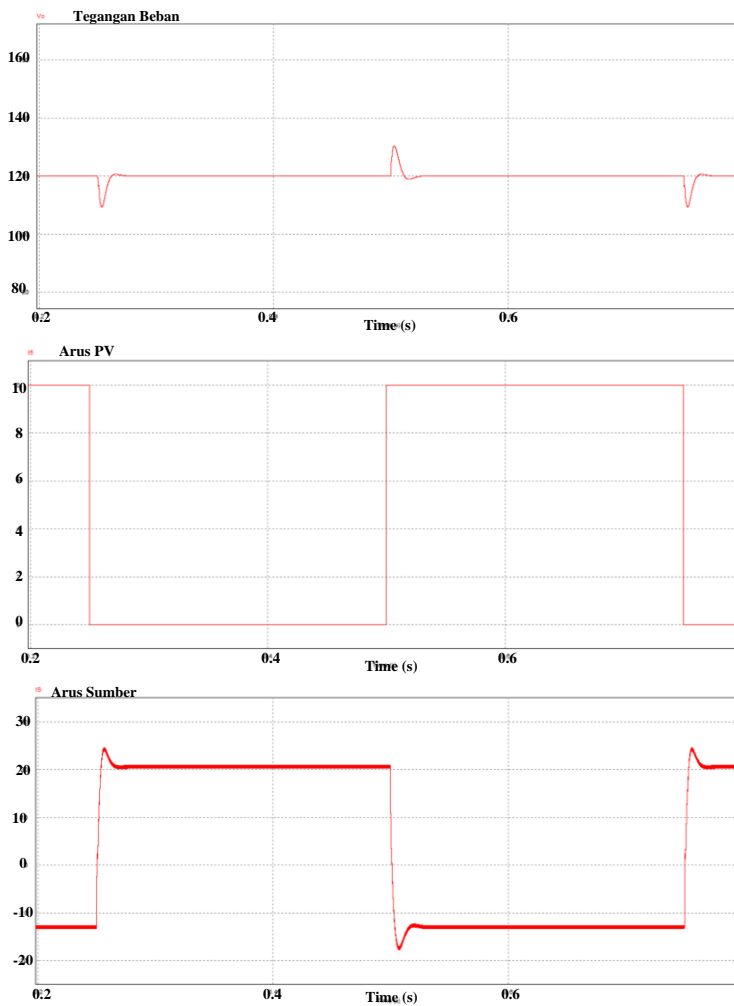
Pengendali yang digunakan sebagai pengendali tegangan dan arus adalah pengendali jenis PI (Proposional Integral). Konstanta pengendali tegangan adalah $K_p = 2$ Dan $T_i = 0,005$, sedangkan pengendali arusnya $K_p = 1$ dan $T_i = 0,005$. Parameter ini belum dioptimasi dan didapat dengan coba-coba. Dalam simulasi, tegangan acuan beban adalah 120 Vdc.

Gambar 3.12 memperlihatkan hasil simulasi tegangan keluaran, tegangan sumber (baterai), dan arus sumber saat tegangan sumber berubah-ubah. Terlihat dengan jelas bahwa pengendali mampu mempertahankan tegangan beban agar tetap saat tegangan sumber berubah-ubah. Dalam simulasi, diasumsikan tegangan sumber berubah secara periodik.

Gambar 3.13 memperlihatkan hasil simulasi saat arus yang dihasilkan oleh PV berubah-ubah. Saat arus PV besar, pengendali akan mempertahankan tegangan beban dengan mengambil kelebihan energi untuk mengisi baterai (arus sumber negatif). Saat arus PV kecil, kekurangan energi dipenuhi dengan mengambil energi baterai untuk memenuhi kebutuhan beban (arus sumber positif).



Gambar 3.12. Tegangan beban (atas), tegangan sumber (tengah), dan arus sumber (bawah) saat tegangan sumber berubah.



Gambar 3.13. Tegangan beban (atas), arus PV (tengah), dan arus sumber (bawah) saat arus PV berubah-ubah.

BAB IV

HASIL PERCOBAAN

4.1 Pendahuluan

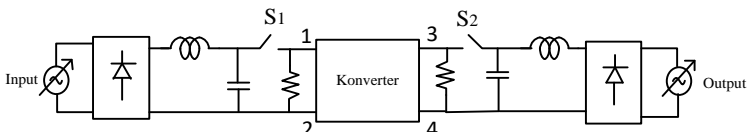
Pada bab sebelumnya, kinerja konverter Sukolilo telah diuji lewat simulasi. Metoda analisis yang digunakan juga telah dibuktikan lewat simulasi. Pada bab ini, konsep dan metoda analisis yang digunakan akan diuji lewat percobaan, Untuk tujuan ini, konverter Sukolilo skala kecil (500 Watt) dibuat. Untuk tahap ini, hanya operasi *open loop* yang diuji. Pengujian *closed loop* diharapkan bisa menjadi tema tugas akhir selanjutnya.

4.2 Skema Sistem

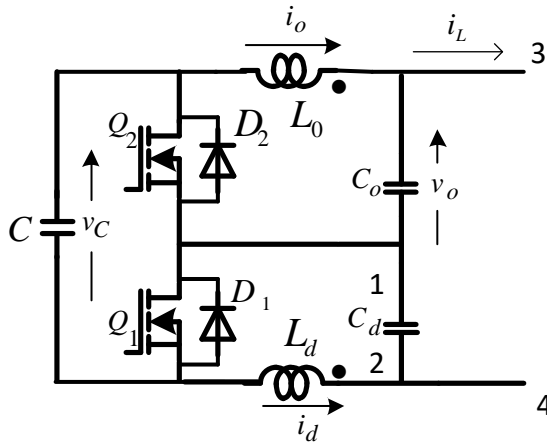
Skema lengkap sistem percobaan yang digunakan diperlihatkan di Gambar 4.1, sedangkan skema konverter Sukolilo yang digunakan diperlihatkan di Gambar 4.2. Spesifikasi konverter Sukolilo yang dirancang adalah:

Tegangan masukan maksimum : 42 Vdc
Tegangan keluaran maksimum : 120 Vdc
Daya maksimum : 500 Watt
Frekuensi Switching minimum : 5 kHz

Tegangan DC masukan konverter didapat dengan menggunakan trafo, penyearah dioda satu-fasa, dan kapasitor perata. Pada sisi keluaran penyearah dipasang resistor sebagai beban saat aliran daya berbalik. Pada sisi keluaran juga dipasang sumber tegangan DC yang juga dibuat dengan menggunakan trafo, penyearah satu-fasa, dan kapasitor perata. Saat aliran daya hanya searah, hanya resistansi di sisi beban yang dipakai. Saat aliran daya dua arah dicoba, saklar penghubung keluaran konverter dan sumber tegangan sisi keluaran ditutup.



Gambar 4.1. Skema sistem percobaan



Gambar 4.2. Skema konverter Sukolilo

4.3 Perancangan Konverter Sukolilo

4.3.1. Pemilihan Saklar Semikonduktor

Berdasarkan spesifikasi yang diinginkan, maka diperlukan saklar semikonduktor :

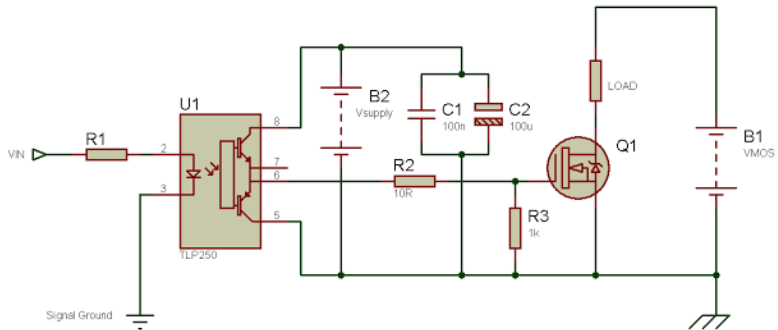
- i) Tegangan lebih besar dari 120 V.
- ii) Arus kerja lebih besar dari $(500/36) = 15$ A

Saklar semikonduktor yang memenuhi kriteria tersebut salah satunya adalah MOSFET IRFP260 dengan data seperti diperlihatkan di Tabel 4.1.

Untuk mengendalikan MOSFET ini, digunakan *gate driver* TLP 250 seperti terlihat di Gambar 4.3 seperti yang direkomendasikan oleh pabrik. *Gate driver* ini mampu digunakan untuk frekuensi penyaklaran sampai 20 kHz.

Tabel 4.1. Data MOSFET IRFP260

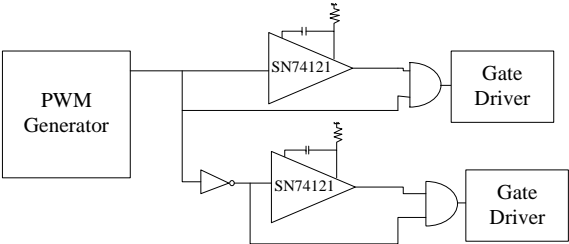
Absolute Maximum Ratings T _C = 25 °C, unless otherwise noted					
Parameter			Symbol	Limit	Unit
Drain-Source Voltage			V _{DS}	200	V
Gate-Source Voltage			V _{GS}	± 2.2	
Continuous Drain Current	V _{GS} at 10 V	T _C = 25 °C	I _D	46	A
		T _C = 100 °C		29	
Pulsed Drain Current			I _{DM}	180	
Linear Dereating Factor				2.2	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy			E _{AS}	1000	mJ
Repetitive Avalanche Current			I _{AR}	46	A
Repetitive Avalanche Energy			E _{AR}	28	mJ



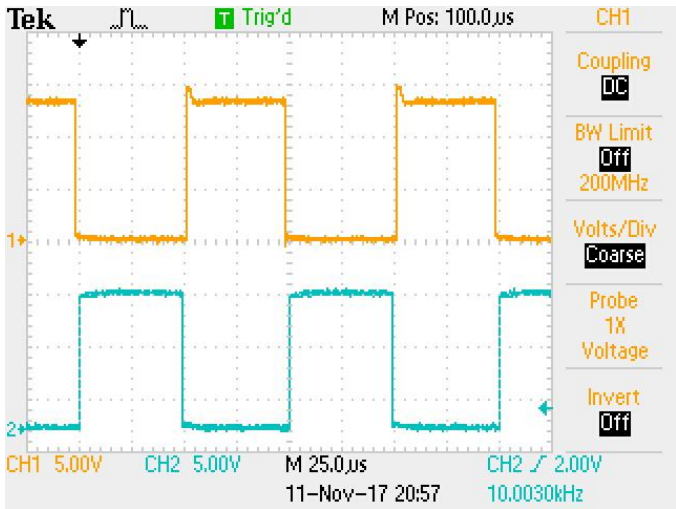
Gambar 4.3. Rangkaian *Gate Driver*

Skema pengendalian dua MOSFET yang digunakan diperlihatkan di Gambar 4.4. Untuk tujuan ini digunakan modul PWM generator. Modul ini bisa menghasilkan sinyal PWM dengan frekuensi bisa diatur mulai dari 1 Hz sampai 100 kHz. *Duty cycle* bisa diatur dari 0 sampai dengan satu. Keluaran PWM generator dipakai untuk mengendalikan saklar MOSFET Q1 sedangkan inversnya dipakai untuk mengendalikan MOSFET Q2. Untuk mencegah terjadinya hubungsingkat, sedikit waktu *deadtime* ditambahkan sebelum masuk ke rangkaian *gate driver* dengan menggunakan IC SN74121 dimana terdapat nilai C dan R eksternal untuk menentukan berapa waktu *deadtimenya*. Waktu *deadtime* sebesar 2 μs

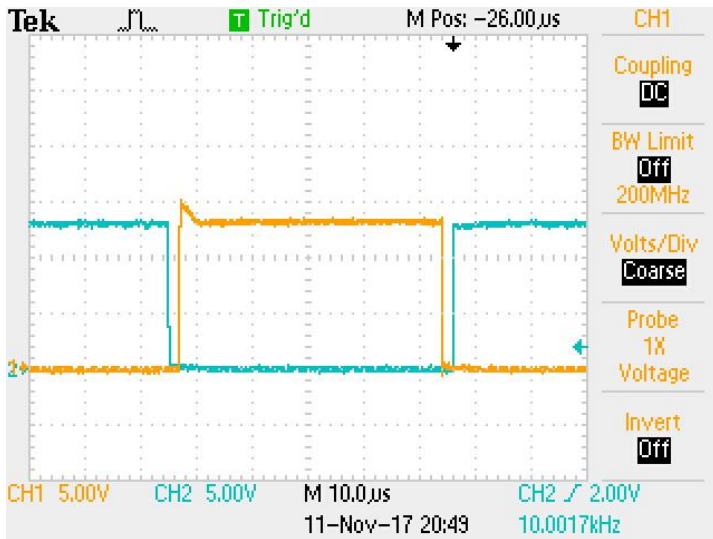
digunakan dalam percobaan. Gambar 4.5 memperlihatkan hasil pengukuran sinyal PWM dengan adanya *deadtime*.



Gambar 4.4. Skema pengendalian dua MOSFET



(a)



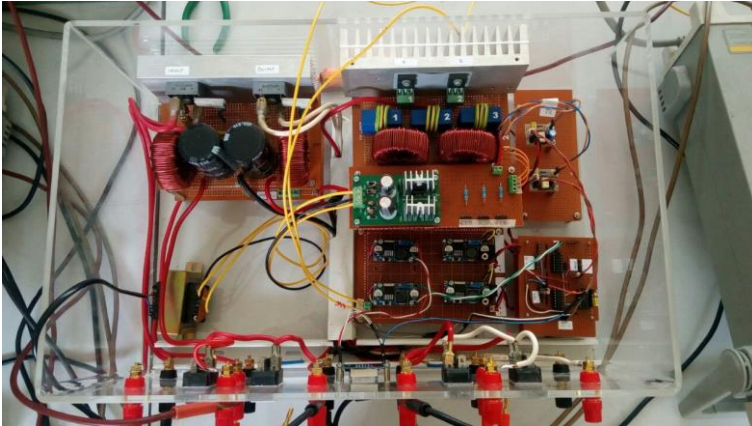
(b)

Gambar 4.5. Sinyal PWM dengan adanya *deadtime*

4.3.2 Pemilihan Kapasitor dan Induktor

Rating arus keluaran dari konverter adalah $500/120 \text{ Vdc} = 4,16\text{A}$. Untuk mendapatkan tegangan keluaran 120 V, konverter Sukolilo harus bekerja pada *duty cycle* 0,7. Karena riak arus induktor kontinu, maka pemilihan kapasitor C_o tidak mengalami hambatan serius. Yang memerlukan perhatian khusus, adalah pemilihan kapasitor C . Berdasarkan persamaan (3-13), kapasitor C yang digunakan pada konverter Sukolilo harus mampu dialiri riak arus sebesar 6,35 A. Sehingga berdasarkan persamaan tersebut diperlukan kapasitor yang mampu dialiri riak arus minimum sebesar 6,35 A. Data kapasitor yang digunakan diberikan dalam lampiran. Berdasarkan persamaan (3-18), nilai induktor minimum agar arus tetap kontinu adalah 1 mH

Dalam percobaan, frekuensi penyaklaran minimum adalah 5 kHz. Sedangkan *duty cycle* minimum adalah 0,2. Untuk menjamin agar konduksi di induktor kontinu, digunakan induktor L_d dan L_o sebesar 2,5 mH. Resistansi induktor yang digunakan adalah 0,063 Ohm. Kapasitansi C adalah 2000 μF sedangkan kapasitansi C_o adalah 1000 μF . Kapasitor yang mewakili tegangan sumber adalah 1000 μF . Gambar 4.6 memperlihatkan konverter Sukolilo yang dibuat.



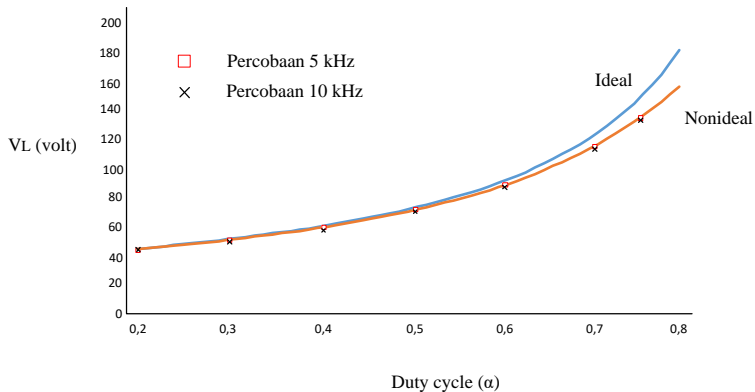
Gambar 4.6. Konverter Sukolilo

4.4 Hasil Pengukuran Tegangan

Pengukuran dilakukan pada resistansi beban sebesar 107,4 Ohm dan pada dua macam frekuensi penyaklaran yaitu 5 kHz dan 10 kHz. Pengukuran juga dilakukan dengan berbagai nilai *duty cycle* dari 0,2 sampai 0,7. Untuk pengambilan datanya digunakan dua *digital powermeter* yang masing-masing dipasang pada sisi masukan dan keluaran konverter. Pertama, nilai *duty cycle* diatur pada PWM generator untuk mendapatkan tegangan keluaran yang diinginkan. Kemudian, tegangan masukan dinaikan secara bertahap (melalui pengaturan ototrafo) sampai 36 Vdc. Hasil pengukuran tersebut dapat dilihat di tabel 4.2. Gambar 4.7 memperlihatkan perbandingan hasil perhitungan tegangan keluaran konverter Sukolilo pada dua macam frekuensi switching. Gambar tersebut dengan jelas menunjukkan akurasi metoda analisis yang diusulkan.

Tabel 4.2. Hasil pengukuran tegangan.

5 kHz				
Vin (volt)	Vout (volt)	DC (α)	Iin (A)	Iout (A)
36,14	44,65	0,2	1,607	1,296
36,02	50,64	0,3	2,093	1,474
36,13	59,12	0,4	2,856	1,721
36	70,23	0,5	4,075	2,044
36,13	87,32	0,6	6,337	2,545
36,08	113,09	0,7	11,081	3,311
10 kHz				
Vin (volt)	Vout (volt)	DC (α)	Iin (A)	Iout (A)
36,09	44,27	0,2	1,595	1,287
36,03	50,3	0,3	2,073	1,464
36,13	58,57	0,4	2,814	1,702
36,3	70,14	0,5	4,048	2,043
36,07	85,95	0,6	6,185	2,504
36,13	112,08	0,7	10,722	3,266



Gambar 4.7. Perbandingan hasil percobaan dengan perhitungan tegangan keluaran

4.5 Hasil Pengukuran Arus Induktor

Pengukuran arus induktor dilakukan pada frekuensi penyaklaran 10 kHz. Pengukuran ini juga dilakukan dengan berbagai nilai *duty cycle* dari 0,2 sampai 0,7. Untuk mendapatkan gelombang arus induktor L_d dan L_o digunakan LEM modul yang dipasang disisi L_d dan L_o agar dapat membaca arus yang lewat. Dari pengukuran ini didapat juga nilai riak arus induktornya. Hasil pengukuran riak arus induktor dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.3. Hasil pengukuran riak arus induktor.

Vin (volt)	Vout (volt)	DC (α)	Iin (A)	Iout (A)	Irms ripple (A)
35,42	43,14	0,2	0,502	0,407	0,1012667
35,4	49,68	0,3	0,658	0,64	0,1535
35,86	58,59	0,4	0,909	0,546	0,21
35,73	69,3	0,5	1,284	0,645	0,2707667
35,13	85,05	0,6	1,979	0,787	0,3474333
34,55	111,36	0,7	3,406	1,037	0,5

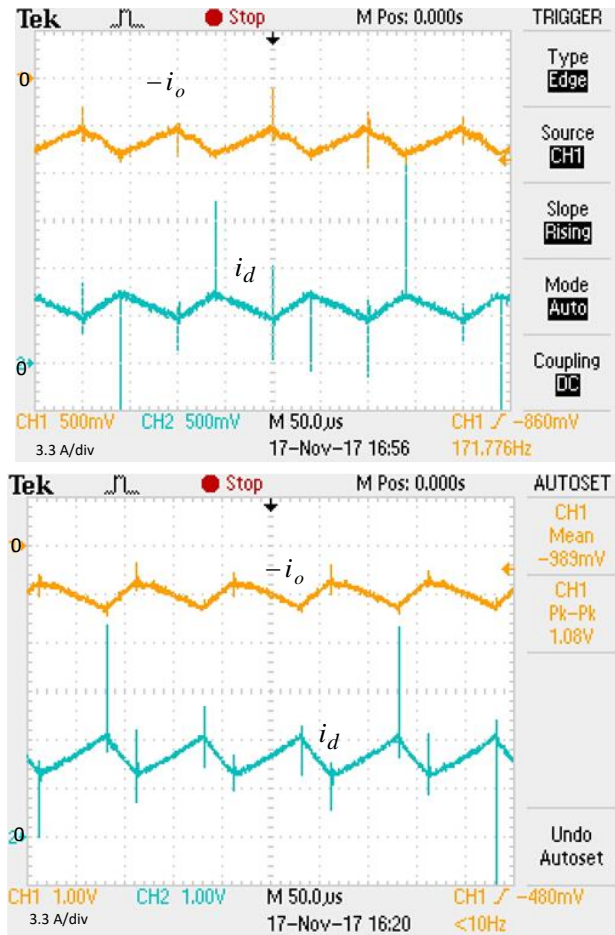
Gambar 4.8 memperlihatkan gelombang arus induktor L_d dan L_o pada dua macam *duty cycle* 0,4 dan 0,7. Terlihat bahwa gelombang arus induktor kontinyu dengan riak yang kecil. Riak yang kecil akan menurunkan tapis kapasitor di sisi masukan dan keluaran. Gelombang arus L_d mempunyai bentuk yang sama dengan arus sumber. Riak yang terkandung di arus sumber harus diserap oleh tapis kapasitor yang terpasang disisi sumber. Sedangkan riak arus L_o harus diserap oleh tapis kapasitor disisi beban.

Gambar 4.9 memperlihatkan perbandingan hasil perhitungan riak arus induktor dan hasil pengukuran. Gambar ini dengan jelas menunjukkan akurasi metoda analisis yang diusulkan. Perbedaan hasil perhitungan dan percobaan dikarenakan adanya susut tegangan di resistansi induktor yang diabaikan dalam perhitungan. Gelombang tegangan keluaran tidak diukur karena riaknya sangat kecil.

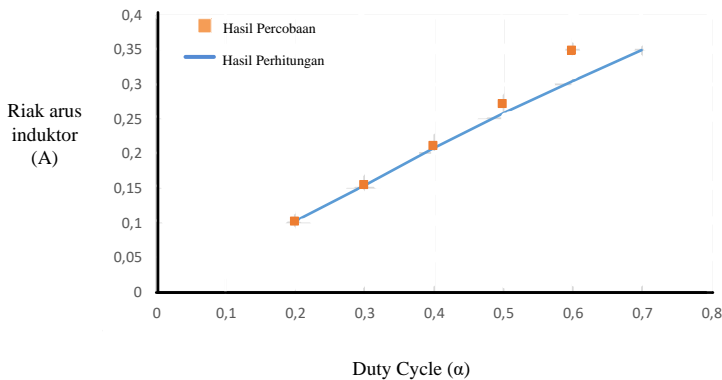
Untuk tegangan 36 Vdc yang dinaikan menjadi 120 Vdc didapat riak arusnya sebesar 0,5 A. Dari data tersebut, kita bisa mendapatkan nilai riak keluaran konverter sebesar

$$\tilde{I}_o = \tilde{I}_{ms} \left(\frac{1}{\omega_s C} \right), \text{dimana } \omega_s = 2\pi f_s \quad (4-1)$$

Berdasarkan persamaan (4-1) didapatkan riak outputnya sebesar 0,00796178 A.



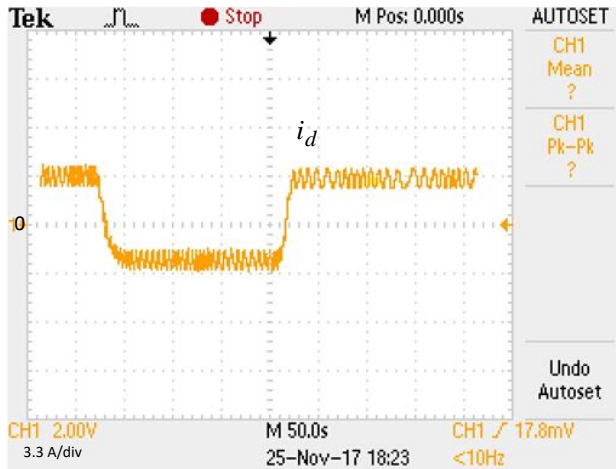
Gambar 4.8. Gelombang arus i_d (biru), dan arus i_o (oranye) untuk *duty cycle* 0,4(atas) dan 0,7(bawah).



Gambar 4.9. Perbandingan hasil percobaan dengan perhitungan riak arus induktor.

4.6 Hasil Pengukuran Aliran Daya Bidirectional

Untuk menguji kemampuan konverter Sukolilo mengalirkan daya pada dua arah, mula-mula konverter diset untuk menghasilkan tegangan keluaran sebesar 100 Vdc. Selanjutnya, tegangan sisi beban diatur sehingga menghasilkan tegangan yang sama. Setelah sama, saklar S2 dimasukkan sehingga keluaran konverter dan tegangan beban terhubung paralel. Selanjutnya, tegangan beban secara bertahap dinaikkan (lewat pengaturan ototrafo) sehingga aliran daya berbalik. Gambar 4.10 memperlihatkan gelombang arus induktor saat aliran daya positif dan saat aliran daya negatif.



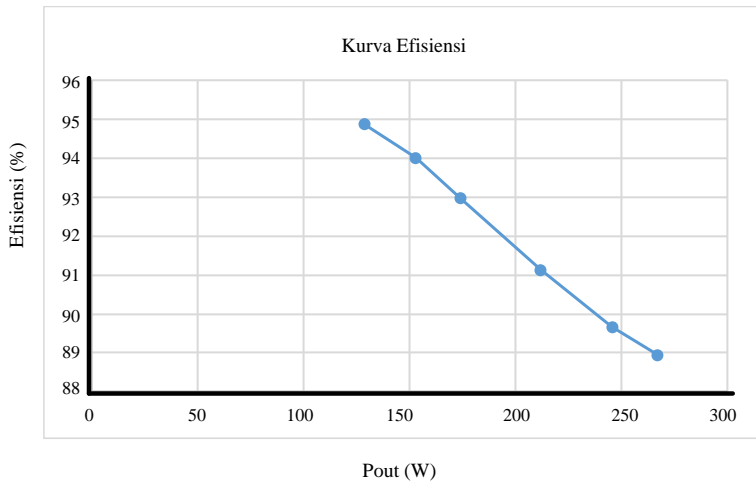
Gambar 4.10. Gelombang arus induktor saat aliran daya positif dan negatif.

4.7 Efisiensi

Pengukuran efisiensi konverter Sukolilo dilakukan dengan tegangan masukan 31,5 Vdc dengan tegangan keluaran 36,28 Vdc. Tegangan keluaran dibuat tetap 36,28 Vdc dengan mengatur nilai *duty cycle* saat bebannya diturunkan maupun dinaikan. Data yang diperoleh merupakan hasil rata-rata dari percobaan yang dilakukan dari daya rendah ke daya tinggi dengan daya tinggi ke daya rendah. Sehingga efisiensi maksimum didapat saat beban maksimum, dan efisiensi minimum didapat saat beban minimum. Efisiensi dapat dihitung dengan cara $(P_{out}/P_{in}) \times 100\%$. Efisiensi maksimum yang didapat dalam pengukuran ini mendekati 95 %. Hasil pengukuran efisiensi dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan kurva efisiensi dapat dilihat pada Gambar 4.11.

Tabel 4.4. Data efisiensi konverter Sukolilo

V_{in} (Vdc)	I_{in} (A)	V_{out} (Vdc)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efisiensi (%)
31,5	4,31	36,28	3,55	135,765	128,794	94,8674
31,5	5,165	36,285	4,215	162,698	152,941	94,0044
31,5	5,945	36,265	4,8	187,268	174,072	92,9625
31,4	7,4	36,29	5,84	232,36	211,757	91,1304
31,4	8,72	36,27	6,765	273,808	245,503	89,6605
31,2	9,62	36,36	3,58	300,144	266,947	88,9397



Gambar 4.11. Kurva Efisiensi

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

- i) Konverter Sukolilo, sebagai hasil modifikasi konverter Cuk, telah diusulkan sebagai konverter dc-dc yang cocok untuk *charging station*.
- ii) Metoda analisis tegangan keluaran, riak arus induktor, dan riak arus kapasitor telah diusulkan. Metoda analisis yang diusulkan telah diverifikasi lewat simulasi dan percobaan.
- iii) Konverter Sukolilo yang dibuat telah diuji kemampuan *bidirectional*nya.
- iv) Riak keluaran dari konverter Sukolilo sebesar 0,00796178 A.
- v) Efisiensi maksimum yang didapat dari konverter Sukolilo sebesar 94,9 %.
- vi) Jika dibandingkan dengan konverter boost, untuk menaikkan tegangan dari 36 Vdc ke 120 Vdc sama-sama membutuhkan *duty cycle* sebesar 0,7. Akan tetapi rugi-rugi yang dihasilkan konverter Sukolilo akan lebih besar karena penggunaan komponennya yang lebih banyak.
- vii) Tidak seperti konverter Cuk konvensional, konverter Sukolilo hanya dapat digunakan untuk menaikkan tegangan. Akan tetapi, untuk menaikkan tegangan dari 36 Vdc ke 120 Vdc, konverter Cuk Konvensional membutuhkan *duty cycle* sebesar 0,77. Sedangkan konverter Sukolilo hanya membutuhkan *duty cycle* sebesar 0,7. Artinya konverter Sukolilo memiliki rugi-rugi yang lebih kecil dibandingkan dengan konverter Cuk konvensional.

4.2 Saran

- i) Studi lebih lanjut mengenai pengendalian konverter Sukolilo perlu dilakukan.
- ii) Studi lebih detail tentang susut daya dan bagaimana meminimumkan perlu dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

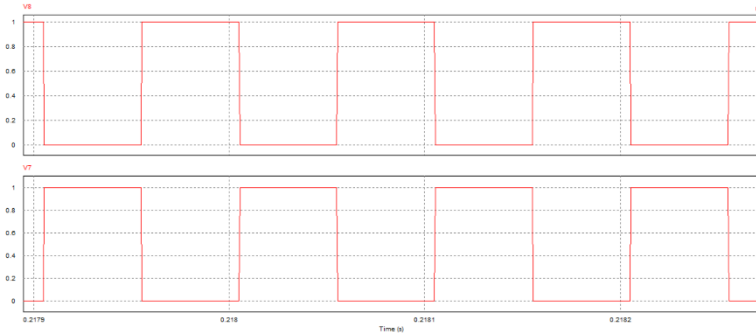
- [1] Bacha et al., "Photovoltaic in Microgrids", *IEEE Ind. Elec. Mag.*, pp. 33-46, March 2015.
- [2] Kouro et al., "Grid-Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Ind. Elec. Mag.*, pp. 47-61, March 2015.
- [3] Wu et al., "Study of a non-isolated Bidirectional DC-DC Converter", *IET Power Electron.*, vol. 6, pp. 30-37, 2013.
- [4] Rashid, "Power Electronics Devices, Circuits, and Applications", *PEARSON*, 4th ed., 2014.
- [5] Kazimierczuk, "Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters", *Wiley*, 2nd ed., 2016.
- [6] Hamid et al., "Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems", *Trans. Power Elec.*, vol. 8, pp. 162-178, 2011.
- [7] Cuk and Middlebrook, "A New Optimum Topology Switching DC-to-DC Converter", *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Ann. Meet.*, pp. 160-179, 1977.
- [8] Cuk, "General Topological Properties of Switching Structures", *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Ann. Meet.*, pp. 109- 130, 1979.
- [9] Maksimovic and Cuk, "General Properties and Synthesis of PWM DC-to-DC Converters", *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Ann. Meet.*, pp. 515-525, 1989.
- [10] Landsman, "A Unifying Derivation of Switching DC-DC Converter Topologies", *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Ann. Meet.* pp. 239-243, 1979.
- [11] Williams, "Generation and Analysis of Canonical Switching Cell DC-to-DC Converters", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 61, no. 1, pp. 329-346, 2014.
- [12] Freeland, "Techniques for the Practical Application of Duality to Power Circuits". *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 7, no. 2, pp. 374-384, April 1992.
- [13] Wu et al., "Modelling PWM DC/DC Converters Out of Basic Converter Units", *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 13, no. 5, pp. 870-881, September 1998.
- [14] Williams, "Basic DC-to-DC Converters", *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 23, no. 1, pp. 387-401, January 2008.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

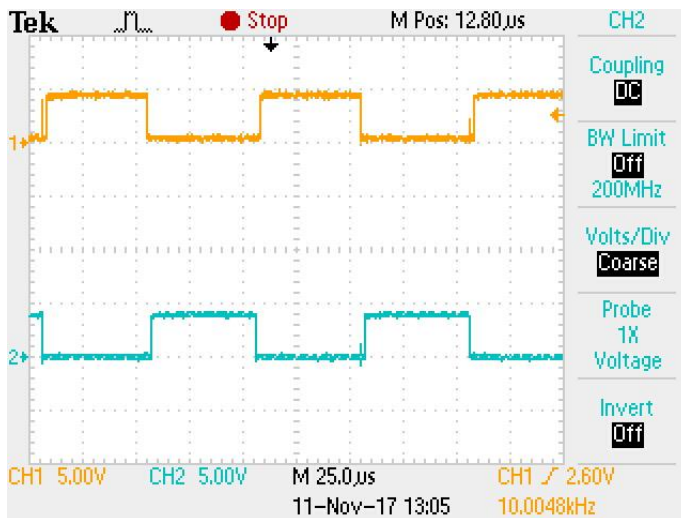
LAMPIRAN

Berikut ini saya lampirkan gambar lainnya dari bentuk gelombang hasil percobaan dan simulasi.

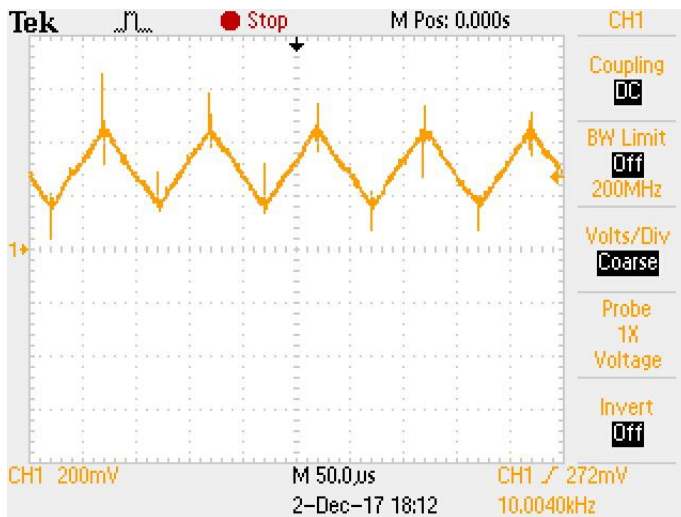
- Gelombang PWM :



Simulasi *duty cycle* 0,5

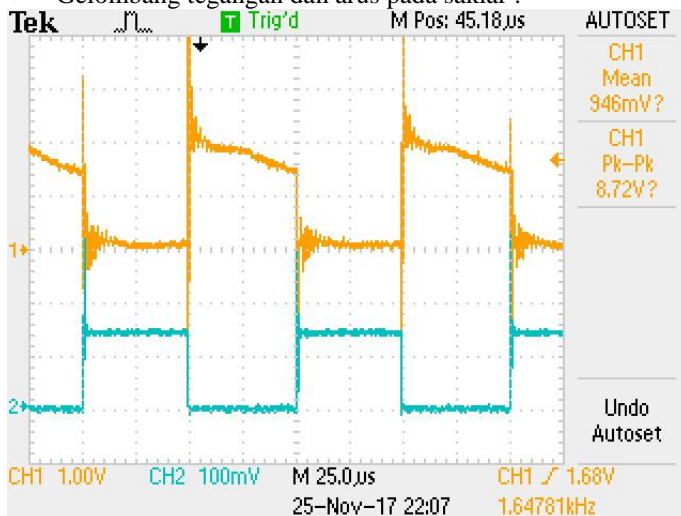


Percobaan sinyal PWM keluaran *gate AND* *duty cycle* 0,5

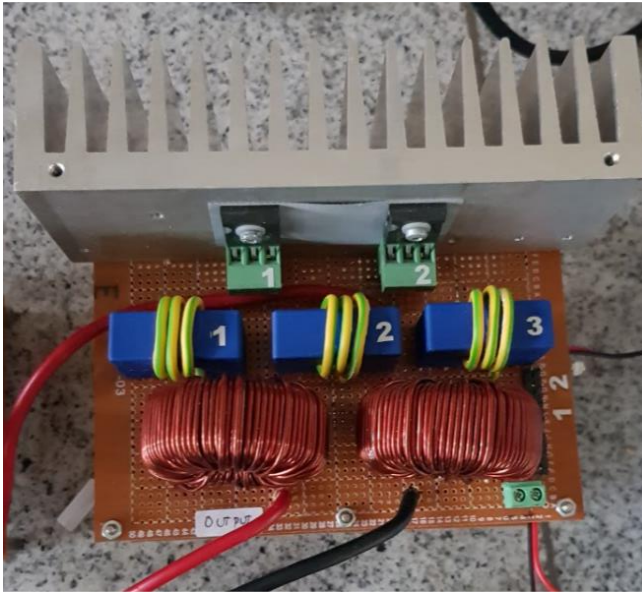


Percobaan gelombang arus i_d duty cycle 0,5

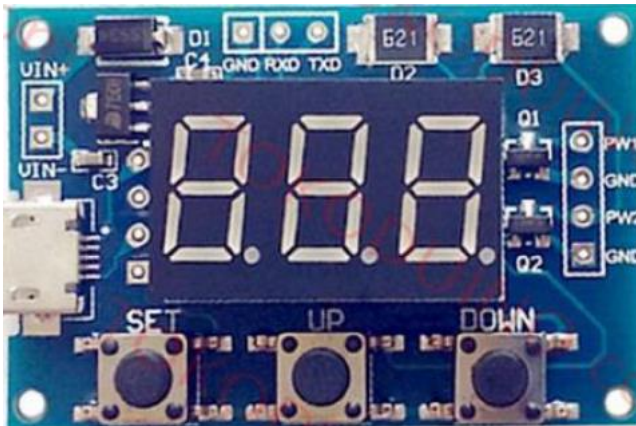
- Gelombang tegangan dan arus pada saklar :



Gelombang tegangan (bawah) dan arus (atas) saat saklar ON dan OFF



Dua buah MOSFET, tiga modul sensor arus, dan dua induktor yang dipakai pada konverter Sukolilo



Digital Adjustable PWM Generator

Persamaan saat Q1 menerima sinyal ON:

$$-E_d + v_{Q0} + R_Q(i_d + i_0) + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + M \frac{di_0}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$-v_C + R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + M \frac{di_d}{dt} + v_0 + v_{Q0} + R_Q(i_d + i_0) = 0$$

(3-6)

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{i_0}{C} \quad (2)$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{i_0}{C_0} - \frac{i_L}{C_0} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_d + R_Q) & -R_Q \\ -R_Q & -(R_0 + R_Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d - V_{Q0} \\ v_C - v_0 - V_{Q0} \end{bmatrix}$$

..... (4)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} \\ -\frac{M}{\Delta} & \frac{L_d}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(R_d + R_Q) & -R_Q \\ -R_Q & -(R_0 + R_Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} \\ -\frac{M}{\Delta} & \frac{L_d}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d - v_{Q0} \\ v_C - v_0 - v_{Q0} \end{bmatrix}$$

..... (5)

yang mana M adalah induktansi mutual antara L_d dan L_0 , dan $\Delta = L_d L_0 - M^2$.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_0}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \\ \frac{dv_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_0(R_d + R_Q)}{\Delta} + \frac{MR_Q}{\Delta} & -\frac{L_0R_Q}{\Delta} + \frac{M(R_0 + R_Q)}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} & \frac{M}{\Delta} \\ \frac{M(R_d + R_Q)}{\Delta} - \frac{L_dR_Q}{\Delta} & -\frac{L_d(R_0 + R_Q)}{\Delta} + \frac{MR_Q}{\Delta} & \frac{L_d}{\Delta} & -\frac{L_d}{\Delta} \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \\ v_C \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta}(E_d - v_{Q0}) + \frac{M}{\Delta}v_{Q0} \\ -\frac{M}{\Delta}(E_d - v_{Q0}) - \frac{L_d}{\Delta}v_{Q0} \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_0} \end{bmatrix}$$

(6)

Persamaan saat Q2 menerima sinyal ON:

Walaupun transistor Q2 yang menerima sinyal ON, arus mengalir melalui dioda antiparalel D2.

$$-E_d + v_{D0} + R_D(i_d + i_0) + v_C + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + M \frac{di_0}{dt} = 0$$

(7)

$$v_0 + R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + M \frac{di_d}{dt} + v_{D0} + R_D(i_d + i_0) = 0$$

(8)

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_d}{C}$$

(9)

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{i_0}{C_0} - \frac{i_L}{C_0}$$

(10)

$$\begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_d + R_D) & -R_D \\ -R_D & -(R_0 + R_D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d - v_{D0} - v_C \\ -v_0 - v_{D0} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} \\ -\frac{M}{\Delta} & \frac{L_d}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(R_d + R_D) & -R_D \\ -R_D & -(R_0 + R_D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta} & -\frac{M}{\Delta} \\ -\frac{M}{\Delta} & \frac{L_d}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d - v_{D0} - v_C \\ -v_0 - v_{D0} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \\ \frac{dv_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_0(R_d + R_D)}{\Delta} + \frac{MR_D}{\Delta} & -\frac{L_0R_D}{\Delta} + \frac{M(R_0 + R_D)}{\Delta} & -\frac{L_0}{\Delta} & \frac{M}{\Delta} \\ -\frac{L_dR_D}{\Delta} + \frac{M(R_d + R_D)}{\Delta} & -\frac{L_d(R_0 + R_D)}{\Delta} + \frac{MR_D}{\Delta} & \frac{M}{\Delta} & -\frac{L_d}{\Delta} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_0 \\ v_C \\ v_0 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{L_0}{\Delta}(E_d - v_{D0}) + \frac{M}{\Delta}v_{D0} \\ -\frac{M}{\Delta}(E_d - v_{D0}) - \frac{L_d}{\Delta}v_{D0} \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_0} \end{bmatrix}$$

(11)

State-Space Averaging

Transistor Q1 menerima sinyal ON selama α periode sedangkan sinyal OFF diterima selama $(1-\alpha)$ periode. Persamaan ruang keadaan rata-rata didapat dengan merata-ratakan persamaan (3-11) dan (3-18), hasilnya adalah

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_d}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_0}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_C}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0[R_d + \alpha R_Q + (1-\alpha)R_D] - M[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -L_0[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - M[R_o + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -\frac{M\alpha + L_0(1-\alpha)}{\Delta} & \frac{M}{\Delta} \\ L_d[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - \frac{\Delta}{C}[R_d + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -L_d[R_o + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - M[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -\frac{L_d\alpha + M(1-\alpha)}{\Delta} & -\frac{L_d}{\Delta} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{\alpha}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_0 \\ \hat{v}_C \\ \hat{v}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0[E_d - V_{Q0}\alpha - V_{D0}(1-\alpha)] + M[V_{Q0}\alpha + V_{D0}(1-\alpha)] \\ M[E_d - V_{Q0}\alpha - V_{D0}(1-\alpha)] + L_d[V_{Q0}\alpha + V_{D0}(1-\alpha)] \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Pada keadaan mantap (steady-state), sisi kiri persamaan (12) nilainya nol sehingga

$$\begin{bmatrix} L_0[R_d + \alpha R_Q + (1-\alpha)R_D] - M[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -L_0[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - M[R_o + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -\frac{M\alpha + L_0(1-\alpha)}{\Delta} & \frac{M}{\Delta} \\ L_d[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - \frac{\Delta}{C}[R_d + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -L_d[R_o + R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] - M[R_Q\alpha + R_D(1-\alpha)] & -\frac{L_d\alpha + M(1-\alpha)}{\Delta} & -\frac{L_d}{\Delta} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{\alpha}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_0 \\ \hat{v}_C \\ \hat{v}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0[E_d - V_{Q0}\alpha - V_{D0}(1-\alpha)] + M[V_{Q0}\alpha + V_{D0}(1-\alpha)] \\ M[E_d - V_{Q0}\alpha - V_{D0}(1-\alpha)] + L_d[V_{Q0}\alpha + V_{D0}(1-\alpha)] \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_0} \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

Jika kita asumsikan :

$$L_d = L_0$$

$$R_d = R_0$$

$$R_D = R_Q$$

$$V_{Q0} = V_{D0}$$

$$M=0$$

Maka

$$0 = \begin{bmatrix} -\frac{L_d[R_d + R_Q]}{L_d R_Q} & -\frac{L_d R_Q}{L_d[R_d + R_Q]} & -\frac{L_d(1-\alpha)}{L_d \alpha} & 0 \\ -\frac{\Delta}{1-\alpha} & -\frac{\Delta}{C} & \frac{\Delta}{0} & -\frac{L_d}{\Delta} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{\alpha}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_0 \\ \bar{v}_C \\ \bar{v}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d[E_d - V_{Q0}] \\ -\frac{\Delta}{L_d V_{Q0}} \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Jadi

$$\bar{i}_0 = I_L \quad (15)$$

$$\bar{i}_d = \frac{\alpha}{1-\alpha} \bar{i}_0 = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_L \quad (16)$$

$$-L_d R_Q \frac{\alpha}{1-\alpha} I_L - L_d (R_d + R_Q) I_L + L_d \alpha \bar{v}_C - L_d \bar{v}_0 - L_d V_{Q0} = 0 \quad (17)$$

$$-L_d (R_d + R_Q) \frac{\alpha}{1-\alpha} I_L - L_d R_Q I_L - L_d (1-\alpha) \bar{v}_C + L_d [E_d - V_{Q0}] = 0 \quad (18)$$

Berdasarkan (3-24) maka

$$\bar{v}_C = \frac{E_d - V_{Q0}}{1-\alpha} - \frac{R_d \alpha + R_Q}{(1-\alpha)^2} I_L \quad (19)$$

Dari (3-25) dan (3-26) maka

$$\bar{v}_o = \frac{\alpha E_d}{1-\alpha} - \frac{V_{Q0}}{1-\alpha} - \frac{R_d (1-2\alpha + 2\alpha^2) + R_Q}{(1-\alpha)^2} I_L \quad (20)$$

Oleh sebab itu tegangan bebannya adalah

$$\bar{v}_L = E_d + \bar{v}_o = \frac{E_d - V_{Q0}}{1-\alpha} - \frac{R_d (1-2\alpha + 2\alpha^2) + R_Q}{(1-\alpha)^2} I_L \quad (21)$$

Analisa Riak

Berdasarkan Gambar 3.3, kita bisa dapatkan persamaan tegangan berikut:

$$\begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d - v_{Q1} \\ v_{Q2} - v_o \end{bmatrix} \quad (22)$$

yang mana v_{Q1} dan v_{Q2} adalah tegangan pada saklar Q_1 dan Q_2 .

Arus dan tegangan bisa kita bagi atas komponen dc dan riak sebagai berikut:

$$i_d = I_d + \tilde{i}_d \quad (23)$$

$$i_o = I_o + \tilde{i}_o \quad (24)$$

$$v_{Q1} = V_{Q1} + \tilde{v}_{Q1} \quad (25)$$

$$v_{Q2} = V_{Q2} + \tilde{v}_{Q2} \quad (26)$$

$$v_o = V_o + \tilde{v}_o \quad (27)$$

yang mana huruf besar dan tanda tilde masing-masing menyatakan nilai rata-rata dan riak.

Jika (23)-(27) kita substitusikan ke (22) dan dipisahkan riaknya maka kita dapatkan

$$\begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} \\ \frac{d\tilde{i}_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{v}_{Q1} \\ \tilde{v}_{Q2} - \tilde{v}_o \end{bmatrix} \quad (28)$$

Berdasarkan persamaann (28) kita dapatkan persamaan riak arus berikut

$$\tilde{i}_d = \frac{L_o}{\Delta} \int (-\tilde{v}_{Q1}) dt - \frac{M}{\Delta} \int (\tilde{v}_{Q2} - \tilde{v}_o) dt + C_1 \quad (29)$$

$$\tilde{i}_o = \frac{L_d}{\Delta} \int (\tilde{v}_{Q2} - \tilde{v}_o) dt - \frac{M}{\Delta} \int (-\tilde{v}_{Q1}) dt + C_2 \quad (30)$$

yang mana C_1 dan C_2 adalah konstanta yang ditentukan oleh syarat batas.

Riak pada saklar jauh lebih tinggi dibanding riak pada kapasitor, atau

$$\tilde{v}_{Q2} \gg \tilde{v}_o \quad (31)$$

Sehingga persamaan (3-36) dan (3-37) bisa didekati dengan

$$\tilde{i}_d = \frac{L_o}{\Delta} \int (-\tilde{v}_{Q1}) dt - \frac{M}{\Delta} \int \tilde{v}_{Q2} dt + C_1 \quad (32)$$

$$\tilde{i}_o = \frac{L_d}{\Delta} \int \tilde{v}_{Q2} dt - \frac{M}{\Delta} \int (-\tilde{v}_{Q1}) dt + C_2 \quad (33)$$

Berdasarkan persamaan (32) dan (33), riak tegangan saklar adalah

$$\tilde{v}_{Q1} = v_{Q1} - V_{Q1} \quad (34)$$

$$\tilde{v}_{Q2} = v_{Q2} - V_{Q2} \quad (35)$$

yang mana

$$V_{Q1} = E_d \quad (36)$$

$$V_{Q2} = V_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} E_d \quad (37)$$

Pada saat saklar Q_1 menerima sinyal ON dan saklar Q_2 menerima sinyal OFF, tegangan saklar Q_1 dan Q_2 adalah

$$v_{Q1} = 0 \quad (38)$$

$$v_{Q2} = \bar{v}_C = \frac{E_d}{1-\alpha} \quad (39)$$

Oleh sebab itu, persamaan riak pada saat saklar Q_1 menerima sinyal ON adalah

$$\tilde{i}_d = \frac{L_o - M}{\Delta} \int E_d dt + C_1 \quad (40)$$

$$\tilde{i}_o = \frac{L_d - M}{\Delta} \int E_d dt + C_2 \quad (41)$$

Pada saat saklar Q_2 menerima sinyal ON, tegangan saklar Q_1 dan Q_2 adalah

$$v_{Q1} = \bar{v}_C = \frac{E_d}{1-\alpha} \quad (42)$$

$$v_{Q2} = 0 \quad (43)$$

Oleh sebab itu, persamaan riak arus saat transistor Q_2 menerima sinyal ON adalah

$$\tilde{i}_d = -\frac{L_o - M}{\Delta} \int \frac{\alpha E_d}{1 - \alpha} dt + C_3 \quad (44)$$

$$\tilde{i}_o = -\frac{L_d - M}{\Delta} \int \frac{\alpha E_d}{1 - \alpha} dt + C_4 \quad (45)$$

yang mana C_3 dan C_4 adalah konstanta.

Nilai konstanta integrasi bisa didapat dari kondisi:

- i) Nilai rata-rata riak selama satu periode harus nol.
- ii) Nilai awal kondisi ON adalah nilai akhir kondisi OFF, demikian pula sebaliknya.

Oleh sebab itu, persamaan riak selama satu periode penyaklaran bisa kita tuliskan sebagai berikut:

$$\tilde{i}_d = \frac{L_o - M}{\Delta} E_d \begin{cases} -\frac{T_{ON}}{2} + (t - t_o) & \text{untuk } t_o \leq t \leq t_2 \\ \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{T_{OFF}}{2} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} (t - t_2) & \text{untuk } t_2 \leq t \leq t_4 \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (46)$$

$$\tilde{i}_o = \frac{L_d - M}{\Delta} E_d \begin{cases} -\frac{T_{ON}}{2} + (t - t_o) & \text{untuk } t_o \leq t \leq t_2 \\ \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{T_{OFF}}{2} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} (t - t_2) & \text{untuk } t_2 \leq t \leq t_4 \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (47)$$

Gambar 3.5 memperlihatkan gelombang riak arus selama satu periode penyaklaran. Nilai rms riak arus selama satu periode penyaklaran bisa dihitung dengan cara

$$\tilde{I}_d = \left[\frac{1}{T_s} \int_{t_o}^{t_o + T_s} \tilde{i}_d^2 dt \right]^{1/2} \quad (48)$$

$$\tilde{I}_o = \left[\frac{1}{T_s} \int_{t_o}^{t_o + T_s} \tilde{i}_o^2 dt \right]^{1/2} \quad (49)$$

Jika persamaan (3-54) dan (3-55) masing-masing kita substitusikan ke (3-56) dan (3-57) maka kita dapatkan

$$\tilde{I}_d = \frac{L_o - M}{2\sqrt{3}\Delta} \frac{\alpha E_d}{f_s} \quad (50)$$

$$\tilde{I}_o = \frac{L_d - M}{2\sqrt{3}\Delta} \frac{\alpha E_d}{f_s} \quad (51)$$

Jika induktansi $L_d=L_o=L$ maka persamaan (50) dan (51) berubah menjadi

$$\tilde{I}_d = \tilde{I}_o = \frac{\alpha E_d}{2\sqrt{3}f_s(L + M)} \quad (52)$$

Pada saat saklar Q_1 menerima sinyal ON maka arus kapasitor C sama dengan $-i_o$. Sedangkan saat saklar Q_2 menerima sinyal ON maka arus kapasitor sama dengan i_d . Oleh sebab itu, arus kapasitor C bisa kita tuliskan

$$i_C = \begin{cases} -I_o & \text{untuk } t_o \leq t \leq t_2 \\ I_d & \text{untuk } t_2 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (53)$$

Pada persamaan (53), kontribusi riak arus induktor pada riak arus kapasitor diabaikan. Jika susut daya diabaikan, rasio arus adalah

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (54)$$

Oleh sebab itu, persamaan (3-62) berubah menjadi

$$i_C = \begin{cases} -I_o & \text{untuk } t_o \leq t \leq t_2 \\ \frac{\alpha I_o}{1-\alpha} & \text{untuk } t_2 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (55)$$

Nilai rms arus kapasitor C selanjutnya dihitung dengan

$$I_C = \left[\frac{1}{T_s} \int_{t_o}^{t_o+T_s} i_C^2 dt \right]^{1/2} \quad (56)$$

Jika persamaan (55) disubstitusikan ke persamaan (56) maka didapatkan

$$I_C = I_o \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{1/2} \quad (57)$$

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Andriazis Dahono, adalah anak kedua dari dua bersaudara. Lahir pada tanggal 23 November 1994 di Bandung, Jawa Barat. Penulis tinggal di Bandung dari lahir sampai tamat SMA. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di TK Salman Al-Farisi Bandung, SDI Salman Al-Farisi Bandung, SMP Taruna Bakti Bandung, dan SMA Taruna Bakti Bandung. Penulis melalui jalur Mandiri kemudian diterima sebagai salah satu mahasiswa di jurusan S1 Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Selama masa kuliah, penulis pernah aktif di beberapa kegiatan kepanitiaan event tingkat jurusan, mengikuti kegiatan UKM Billiard ITS, dan mengikuti pelatihan yang diadakan oleh laboratorium Tegangan Tinggi.